

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI

Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal

José Jhones Matuda

**PESQUISA OPERACIONAL APLICADA À EXTRAÇÃO DE MADEIRA COM
SKIDDER EM FLORESTAS EQUIÂNEAS**

Diamantina

2019

José Jhones Matuda

**PESQUISA OPERACIONAL APLICADA À EXTRAÇÃO DE MADEIRA COM
SKIDDER EM FLORESTAS EQUIÂNEAS**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em
Ciência Florestal da Universidade Federal dos Vales
do Jequitinhonha e Mucuri, como requisito para
obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Angelo Márcio Pinto Leite

Diamantina

2019

Elaborado com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M445p	<p>Matuda, José Jhones.</p> <p>Pesquisa operacional aplicada à extração de madeira com skidder em florestas equiâneas / José Jhones Matuda, 2019.</p> <p>67 p. : il.</p> <p>Orientador: Angelo Márcio Pinto Leite</p> <p>Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2019.</p> <p>1. Colheita florestal. 2. Roteamento de veículo. 3. Heurística. 4. Vizinho mais próximo. I. Leite, Angelo Márcio Pinto. II. Título. III. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.</p> <p style="text-align: right;">CDD 634.92</p>
-------	--

José Jhones Matuda

**PESQUISA OPERACIONAL APLICADA A DE EXTRAÇÃO DE MADEIRA COM
SKIDDER EM FLORESTAS EQUIÂNEAS**

Tese apresentada ao DOUTORADO EM
CIÊNCIA FLORESTAL, nível de
DOUTORADO como parte dos requisitos para
obtenção do título de DOUTOR EM CIÊNCIA
FLORESTAL.

Orientador (a): Prof. Dr. Angelo Márcio Pinto
Leite

Data de aprovação : 05/08/2019

Prof. Dr. ANGELO MÁRCIO PINTO LEITE

Prof. Dr. GUSTAVO EDUARDO MARCATTI

Prof. Dr. CARLOS EDUARDO SILVA VOLPATO

Prof^a. Dr^a. LUCIANA PEREIRA DE ASSIS

Prof^a. Dr^a. GLEYCE CAMPOS DUTRA

Diamantina

DEDICO

A minha esposa Regiane e minha filha Isabele.

Ao meu pai Toshiaki, a minha mãe Neusa e a meu padrasto José Roberto.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida e a renovação das esperanças em cada manhã, e por ter me amparado e dado forças nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador. Professor Dr. Angelo Márcio Pinto Leite por todo apoio dado durante esta jornada de desafio, construção e amadurecimento.

Ao professor Dr. Euler e a professora Dra. Luciana pelas conversas e dicas durante a elaboração deste trabalho.

A professora Gleyce pela disponibilidade de tempo e fornecer parte dos materiais necessários para esta pesquisa.

Ao professor Dr. Gustavo Marcati pelo auxílio em momentos de dúvidas.

Aos membros da banca avaliadora, efetivos e suplentes.

A empresa APERAM Bioenergia, principalmente a seus funcionários Marcelino e Enoque.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Florestal pelo aprendizado e amizades.

A UFVJM, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, por tanto contribuir em minha formação acadêmica e profissional.

A minha família pelo apoio, em especial a minha esposa pelo carinho, cuidado e por toda responsabilidade assumida durante este período aperfeiçoamento.

Aos meus amigos, voluntários e ex-voluntários do projeto CTFlor, Luiz Carlos, Luiz Paulo, João Victor, Leonardo, Christiene e Iolanda.

A todos, que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes.”

Marthin Luther King

RESUMO

A colheita florestal é uma das atividades mais onerosas do setor florestal brasileiro. Seu correto planejamento é de fundamental importância para a viabilidade das atividades que envolvem todo o processo. O uso de ferramentas computacionais como *Softwares* de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e outros sistemas integrados para gestão empresarial tem possibilitado grandes avanços no planejamento das atividades das empresas florestais. Outra importante ferramenta de apoio as tomadas de decisões nas empresas tem sido a Pesquisa Operacional (PO). Objetivou-se com este trabalho propor rotas viáveis para o trator florestal *Skidder* em uma floresta equiânea por intermédio da PO, utilizando-se para isso o algoritmo heurístico Vizinho Mais Próximo adaptado. A pesquisa foi dividida em duas etapas, a geração de um ambiente simulado próximo ao real e, a adaptação do algoritmo Vizinho Mais Próximo para otimizar o deslocamento simulado do *Skidder*. O *script* gerado foi processado com cinco (5) pontos de início da atividade de extração com a finalidade de identificar diferenças na distancia total percorrida pela máquina. A simulação de uma área com dimensões próximas as reais foi realizada no *softwares* Qgis e representando 25% de um talhão de 50 hectares. Com o uso da linguagem computacional *Python* foi possível traçar um deslocamento viável para o *Skidder* por intermédio de uma adaptação do algoritmo Vizinho Mais Próximo. Os resultados mostraram que é possível realizar a otimização da rota a ser percorrida e que, utilizando este processo de otimização, a posição inicial do *Skidder* para o início da atividade praticamente não altera o valor final da distância percorrida. A otimização por meio do algoritmo do Vizinho Mais encontrou uma alternativa viável para a sequência de extração dos feixes de madeira com o *Skidder*.

Palavras chave: colheita florestal; estudo de tempos e movimentos; roteamento de veículo; heurística; vizinho mais próximo.

ABSTRACT

Forest harvesting is one of the most costly activities in the Brazilian forest sector. Its correct planning is of fundamental importance for the viability of the activities that involve the whole process. The use of computational tools such as Geographic Information Systems (GIS) software and other integrated systems for business management has enabled major advances in the planning of forest enterprise activities. Another important tool to support decision making in companies has been Operational Research (OP). The objective of this work was to propose viable routes for the Skidder forest tractor in an equestrian forest through the OP, using the adapted Nearest Neighbor heuristic algorithm. The research was divided into two stages, the generation of a simulated real environment and the adaptation of the Nearest Neighbor algorithm to optimize the simulated displacement of Skidder. The generated script was processed with five (5) starting points of the extraction activity in order to identify differences in the total distance traveled by the machine. The simulation of an area close to real dimensions was performed using Qgis software and representing 25% of a 50 hectare plot. Using the Python computational language it was possible to trace a viable offset to Skidder by adapting the Nearest Neighbor algorithm. The results showed that it is possible to optimize the route to be traveled and that, using this optimization process, the initial position of the Skidder for the beginning of the activity practically does not change the final value of the distance traveled. Optimization using the adapting Nearest Neighbor algorithm found a viable alternative to the wood beam extraction sequence with Skidder.

Keywords: forest harvesting; vehicle routing; heuristic; nearest neighbor.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral.....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1 Setor florestal brasileiro.....	15
3.2 Colheita florestal.....	16
3.2.1 <i>Sistemas de colheita florestal</i>	19
3.2.1.1 Sistema de Toras Curtas (<i>Cut to length</i> – CTL)	20
3.2.1.2 Sistema de toras longas (<i>Tree-length</i>):	21
3.2.1.3 Sistema de árvores inteiras (<i>Full-tree</i> - FT)	21
3.2.1.4 Sistema de Árvores Completas (<i>Whole-tree</i>)	22
3.2.1.5 Sistema de Cavaqueamento (<i>Chipping</i>)	23
3.2.2 <i>Skidder</i>	23
3.2.3 <i>Planejamento das operações de colheita florestal</i>	27
3.3 Pesquisa operacional (PO)	28
3.3.1 <i>Aplicação no Setor Florestal</i>	30
4 MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 Definição do problema	33
4.2 Definição de rota de deslocamento.....	34
4.2.1 <i>Simulação de um ambiente virtual</i>	34
4.2.2 <i>Definição de rota</i>	41
4.2.2.1 Visão geral do algoritmo	42
4.2.2.2 Restrições de deslocamento.....	42
4.2.2.3 Definição da rota viável.....	45
4.2.3 <i>Processamento dos dados</i>	47
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49

6 CONCLUSÕES..... XX

7 RECOMENDAÇÕES..... XX

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS XX

1 INTRODUÇÃO

O ser humano tem feito uso dos recursos florestais desde os primórdios da humanidade, extraindo deles alimento, proteção e energia. Dentre estes recursos, produtos a madeira apresenta papel de destaque, pois contribuiu para o crescimento e desenvolvimento de todas as civilizações, seja na construção civil, naval, para uso militar, produção de papel ou demais usos.

A exploração madeireira foi responsável por movimentar a economia mundial por séculos, sendo inclusive a primeira atividade econômica em terras brasileiras. Séculos se passaram e a população depende ainda diretamente ou indiretamente da madeira, o que faz deste produto florestal uma matéria-prima estratégica tanto do ponto de vista político, como comercial.

Embora pouco conhecido pela população, o setor florestal brasileiro apresenta grande importância comercial, deixando de ser exclusivamente extrativista para ser um sistema produtivo de plantios em larga escala. A introdução das culturas florestais no Brasil, principalmente o eucalipto, se deu em meados do século XX (LEÃO, 2000; MACHADO *et al.*, 2014).

O setor florestal é bem desenvolvido e altamente tecnificado tecnológico, com grandes investimentos em mecanização e o uso de máquinas e equipamentos modernos projetados para otimizar os resultados, porém muita tecnologia ainda pode ser incorporada. Setores como a agricultura de precisão (AP) podem contribuir muito com a melhoria tecnológica do setor florestal, tanto com relação a técnicas de cultivo, preparo do solo, como no desenvolvimento da mecanização.

A AP atingiu um patamar de tecnologia que permite as empresas monitorar suas máquinas remotamente há mais tempo, além de terem um controle preciso sobre aplicação de insumos e dados da colheita. Mapas sobre diversas propriedades de solo e produção auxiliam na predição futura e no melhor aproveitamento na correção do solo e nutrição das plantas (INAMASU *et al.*, 2011). Para compensar um pouco a falta destes detalhes fornecidos pela AP, a mecanização florestal tem aberto as portas para um novo horizonte de possibilidades. Máquinas desenvolvidas para cumprir tarefas antes executadas de forma manual, deram lugar à automação completa de determinados setores, visando maior produtividade.

Exemplos sobre a importância do desenvolvimento de tecnologias no setor florestal são: o Guincho *Work* acoplado ao *Forwarder* que têm possibilitado a colheita e

extração no Sistema de Toras Curtas e Longas em áreas com inclinação antes inoperantes para a mecanização; o uso de GPS que tem possibilitado melhor alinhamento nos plantios e, o uso de *drones* que possibilita uma melhor visão da sanidade das culturas (identificação de ataques de pragas), proteção patrimonial, entre outras funcionalidades.

Além destas tecnologias desenvolvidas especificamente para o setor florestal, outras aplicadas no meio agrícola podem ser importadas e incorporadas no sistema produtivo e manejo das florestas plantadas. Estas tecnologias têm em comum a necessidade de desenvolvimento de ferramentas computacionais que permitam sua aplicação prática no campo, além da expansão das atividades rurais, maior desempenho operacional e melhores condições de trabalho.

Ferramentas de inteligência artificial e o aprendizado de máquina são extremamente úteis para a nova era da revolução industrial, sendo um dos desafios aos pesquisadores, o desenvolvimento de tecnologias capazes de otimizar a operação e garantir maior produtividade.

Para se garantir a otimização das atividades e a redução dos custos não é apenas necessário o investimento em máquinas com grande tecnologia embarcada ou em supercomputadores, mas também focar na Pesquisa Operacional (PO), sendo esta uma linha de atuação que disponibiliza ferramentas para a tomada de decisão auxiliares ao planejamento das atividades.

Kramer *et al.* (2016) apontam que a definição de rotas a serem percorridas por veículos é uma das aplicações mais clássicas da PO, sendo muito importante para a redução de custos de empresas de transporte. Desta forma, a delimitação de traçado de estradas, definição de rota, alocação de pátios e pontos de apoio são apenas alguns dos exemplos de aplicação da PO em empresas de base florestal.

A possibilidade de aumentar a produtividade e reduzir o custo por meio de um pré-planejamento das atividades que envolvem a colheita florestal é grande importância para a viabilidade financeira do projeto em questão. O uso de uma tecnologia de baixo custo, principalmente operacional, pode trazer muitos benefícios para o planejamento das atividades.

Uma das atividades realizadas na colheita florestal que pode ser fortemente impactada pela rota percorrida é a operação com o *Skidder*. Esta máquina tem sua produtividade diretamente ligada ao seu deslocamento. Quanto maior for sua distância média percorrida, menor será sua produção e maior seu custo operacional.

Conhecer a área, suas condições edáficas, físicas e de produtividades contribuem para a confecção de um microplanejamento adequado. Assim, inserir a este uma maior precisão nas atividades a serem executadas, reduzindo a intervenção do operador no planejamento da atividade e mantendo sua concentração focada na operação, pode permitir um ganho significativo para a empresa. Portanto, o desenvolvimento de tecnologias que possam auxiliar aos trabalhadores no desenvolvimento de suas atividades e à solucionar problemas das linhas de produções constitui um dos focos da pesquisa científica. Neste contexto que buscou-se com o desenvolvimento desta pesquisa planejar o deslocamento do *Skidder* e a sequência de extração da madeira dentro de um talhão de eucalipto. É possível o planejamento desta etapa no escritório antes de ser aplicada em campo, garantindo homogeneidade na distribuição das pilhas e antecipando qualquer influência externa prevista, como questões de segurança e preservação ambiental.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Objetivou-se com este trabalho propor uma metodologia que permita otimizar a atividade de extração com o *Skidder* em um talhão de florestas equiâneas colhidas pelo *Feller-buncher*, de forma a pré-definir a sequência dos feixes retirados durante a operação.

2.2 Objetivos Específicos

Criar um ambiente simulado em um *software* de SIG QGIS com dimensões próximas às reais encontradas em campo.

Apresentar uma sequência viável para a extração dos feixes posicionados no interior do talhão por intermédio do uso do algoritmo do vizinho mais próximo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Setor florestal brasileiro

Entende-se por setor florestal todo o conjunto de atividades produtivas primárias e secundárias que exploram, conservam, manejam e renovam e ou implantam florestas, bem como utilizam a madeira como principal insumo na transformação industrial (BREPOHL, 1980).

Seguindo esta premissa, o setor florestal brasileiro vem desde a colonização do Brasil com a exploração do pau-brasil. Entretanto, a primeira indústria nacional a se favorecer das benesses das matas brasileiras foi a Companhia Florestal Paranaense fundada em 1871, a qual não obteve sucesso na exploração da *Araucaria angustifolia* devido às dificuldades no transporte da madeira (ZATTI, 2017; TRINDADE, 2009).

Um grande salto para a silvicultura brasileira foram os povoamentos florestais com *Eucalyptus sp.* formados pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro em 1904. Estes plantios comerciais foram formados com o intuito de atender a demanda por matéria-prima para produção de dormentes, poste e lenha (MARTINI, 2010; VENTURIN *et al.*, 2014).

Com a introdução do eucalipto no Brasil no início do século XX abriu-se as portas para o desenvolvimento de melhoramento genético que colocaria o país como referência mundial. Comparado com outros países, principalmente europeus, conseguiu-se atingir com o eucalipto uma produção dez vezes maior do que as conseguidas por eles em suas principais espécies utilizadas. Em geral, a finalidade da madeira de eucalipto no Brasil é a produção de celulose, de carvão e chapas duras (BERTOLA, 2013).

As pesquisas em programa de melhoramento genético e práticas silviculturais do eucalipto tem uma importância enorme para o desenvolvimento do setor florestal no Brasil, pois permitiram um salto de produtividade de 10 m³/ha/ano na década de 1960, para volumes superiores a 40 m³/ha/ano nas primeiras décadas do século XXI (SANTANA *et al.*, 2014; GONÇALVES *et al.*, 2008).

Outra grande cultura florestal que se destacou em território nacional foi a do *Pinus sp.*, introduzida em meados de 1880 por imigrantes europeus e, em 1948, pelo Serviço Florestal do Estado de São Paulo, mas que realmente se popularizou na década de 60 do século XX. As espécies introduzidas apresentaram boa adaptação nas regiões Sul e Sudeste,

mas os estados do Sul foram os que mais investiram nesta cultura, principalmente pela sua resistência as geadas que ocorrem frequentemente nessa região do país (SHIMIZU, 2008).

Com condições ambientais favoráveis, grande extensão territorial, tecnologia silvicultural avançada e rápido crescimento das plantações florestais quando comparado com outros países, o setor florestal brasileiro tem grande potencial de expansão, tanto no cultivo como no manejo florestal sustentável de nativas (SOARES, 2006; VCP, 2004).

A Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2018) apresentou dados que representam o setor florestal em 2017. A área estimada ocupada por plantios neste ano foi de 7,84 milhões de hectares, sendo que a indústria de celulose e papel possui a maior área de plantios (35%), seguido dos produtores independentes (30%) e, em terceiro, as empresas de siderurgia e carvão vegetal (13%). Este setor gerou receita bruta em torno de 73,8 bilhões de reais, o que representou 1,1% do PIB nacional e 6,1% do PIB Industrial, garantindo um saldo na balança comercial de 9,0 bilhões de dólares, sendo responsável por 0,9% da arrecadação nacional. Na questão social estima-se que o setor empregue 508 mil pessoas de forma direta, alcançando 3,7 milhões de empregos gerados se somados os indiretos e pelo efeito da renda. Outra grande importância do setor está na responsabilidade ambiental pois, somando-se as áreas dos representados pela associação IBÁ, estima-se que para cada hectare plantado exista 0,7 ha de área preservada.

Sousa *et al.* (2010) e Soares *et al.* (2014) afirmam que o setor florestal se configura como um setor-chave na economia nacional, contribuindo sobremaneira para o saldo positivo da balança comercial.

3.2 Colheita florestal

A colheita florestal envolve um conjunto de operações que visam preparar e levar a madeira de um maciço florestal até o local de transporte. Para se cumprir este objetivo de forma eficaz é necessário um bom planejamento, com a utilização de técnicas e procedimentos pré-estabelecidos (MACHADO *et al.*, 2014, CARMO *et al.*, 2015).

Considerado como a parte mais onerosa e importante do ponto de vista tecnológico nas atividades florestais de campo, a colheita florestal mecanizada era praticamente inexistente até a década de 1940 (MACHADO *et al.*, 2014).

Uma das primeiras máquinas a trazer evolução à colheita florestal foi a motosserra. Estas máquinas chegaram ao Brasil entre as décadas de 1960 e 1970, porém sua

invenção data do início do século XX (PARISI, 2005; SANT'ANNA, 2014). Antes de seu desenvolvimento e aplicação ao meio florestal o corte/derrubada de árvores foi realizado por séculos com o machado, serrote traçador e serra de arco. Esta transição do corte manual para o semimecanizado com motosserra, ocorreu no Brasil nas décadas de 1950 e 1960, mas foi com a instalação de fábricas multinacionais na década de 1970 que elas se popularizaram no uso florestal (SANT'ANNA, 2014).

Uma maior mecanização no setor florestal brasileiro iniciou-se na década de 1970, principalmente com a fabricação de equipamentos nacionais e adaptados do setor agrícola, sendo suas principais aplicações nas operações de carregamento e extração (baldeio). Na década de 1980 iniciou-se a utilização dos primeiros *Feller-bunchers* produzidos no Brasil (Figura 1) (MACHADO *et al.*, 2014).



Figura 1: *Feller-buncher* de tesoura utilizado no Brasil na década de 1980.

Fonte: Implanor

Graças à quebra da proibição de importação de veículos em 1990 e à modificação da Lei de Informática em 1991, houve grande avanço tecnológico na indústria automobilística e de máquinas em geral (MENDONÇA, 2010; COSTA, 2007; SODRÉ, 2010; SALLUM JR., 2011). Este fato beneficiou a mecanização das atividades florestais com a introdução de

máquinas com alta tecnologia embarcada no mercado nacional, que não possuía ainda profissionais capacitados às exigências desses equipamentos. Isso gerou o chamado *gap* tecnológico do processo de mecanização florestal, tendo como um grande desafio à época, a qualificação adequada destes profissionais que operariam estas máquinas (PARISE, 2005). Este *gap* tecnológico embora tenha se reduzido ao longo dos anos, ainda apresenta uma lacuna considerável entre o estágio de desenvolvimento dos profissionais e a tecnologia embarcada nas máquinas.

A entrada de novas tecnologias e o grande investimento no setor florestal possibilitou a mecanização de todas as etapas da colheita florestal. Embora estas máquinas possuam alto custo de aquisição e de manutenção, a elevada capacidade produtiva tornou o método mecanizado o mais utilizado no Brasil pelas grandes empresas. As etapas da colheita florestal podem ser divididas basicamente em três fases: corte (incluindo a derrubada, o desgalhamento e o processamento), extração (que corresponde à colocação da madeira em um local de fácil acesso) e, o transporte para o local de utilização. Otimizar estas operações e as interações entre todos os componentes desse sistema é o grande desafio a ser enfrentado pelos profissionais da área na atualidade (MALINOVSKI *et al.*, 2008; MACHADO, 2014; GONÇALVES, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2018).

A atratividade da mecanização florestal para as empresas não está apenas na capacidade produtiva, mas também por proporcionar redução de mão de obra e do custo total da produção em um tempo relativamente curto. Outro fator é a humanização do trabalho, pois proporciona condições de trabalho mais ergonômicas melhorando assim a qualidade de vida do operador, além disso, a mecanização possibilita melhorias nas características do produto final e redução dos danos ambientais (PAULA, 2011; VIEIRA *et al.*, 2016).

Nascimento (2011) ressalta que a quantidade de marcas e modelos existentes para atender a demanda da mecanização na colheita florestal é alta, levando algumas empresas a adotarem uma variada linha de maquinários e implementos. A grande quantidade de máquinas exigida torna a atividade de colheita florestal uma das operações mais onerosas no preço final da madeira, porém é extremamente necessária (MACHADO, 2014; SCHETTINO *et al.*, 2015).

Para evitar prejuízos e gastos desnecessários de espaço deve-se planejar bem com quais marcas trabalhar, quais máquinas e a quantidade a ser utilizada, além de capacitar corretamente os operadores que irão realizar as atividades. Um exemplo é o espaço necessário no almoxarifado, pois quanto maior a quantidade de marcas e modelos, maior será o estoque

de peças de reposição a serem adquiridas e armazenadas. Embora a mecanização seja a melhor opção para grandes e médias empresas, existem vários fatores a serem considerados no planejamento que podem viabilizar ou não a sua aplicação. Para Machado e Lopes (2014) a etapa de planejamento é uma das principais para garantir a sobrevivência da empresa e definir a melhor forma de se realizar a colheita dos povoamentos florestais. Escolher o sistema adequado e o modal necessário para atender a demanda vai muito além do que se basear apenas na finalidade da madeira a ser retirada do talhão. É necessário considerar também as espécies utilizadas, a prognose de produção, a topografia, as condições climáticas da região, o rendimento e os custos operacionais das máquinas cogitadas, a ergonomia e a tecnologia das máquinas e segurança da operação, bem como uma correta capacitação dos colaboradores.

São muitos os fatores que podem interferir na produtividade das operações da colheita mecanizada e todos devem ser levados em consideração durante o planejamento. Para Seixas e Castro (2014) alguns fatores que interferem na produtividade das máquinas de extração são: densidade do talhão; topografia; condições climáticas; tipo de solo; volume individual (VMI) e distância média de extração (DME). Ainda pode ser acrescentado a esta lista a qualificação e experiência do operador, suas condições psicológicas, manutenção preventiva e capacidade operacional das máquinas.

De uma forma geral pode-se dividir a mecanização da colheita florestal em três linhas de acordo com o porte da empresa. Pequenas empresas tendem a utilizar métodos mais rudimentares e tradicionais com mão de obra não especializada e barata, normalmente fazem uso de motosserras e tratores agrícolas adaptados. Empresas de médio porte normalmente utilizam máquinas leves, de fabricação nacional, às vezes projetada para outro setor, como escavadoras hidráulicas adaptadas e, mão de obra qualificada. E por último, as grandes empresas que além de máquinas leves podem fazer uso de máquinas médias e pesadas altamente sofisticadas e produzidas para a finalidade de colheita florestal (MALINOVSKI, 2014).

3.2.1 Sistemas de colheita florestal

Silva *et al.* (2016) entende que um sistema possui, obrigatoriamente, duas características básicas: o propósito/objetivo e a totalidade. A totalidade representa a influência que qualquer alteração no sistema tem nele como um todo.

O sistema de colheita florestal compreende um conjunto de elementos e processos que envolvem a cadeia de produção e todas as atividades parciais. Os principais sistemas são: Sistemas de Toras Curtas; Sistemas de Toras Longas; Sistemas de Árvores Inteiras; Sistemas de Árvores Completas e Sistema de Cavaqueamento (MALINOVSKI *et al.* 2014)

No Brasil há dois sistemas predominantes: Toras Curtas e Árvores Inteiras (MACHADO 2014). As empresas também podem definir seu sistema de colheita de acordo com o objetivo final desejado para a madeira a ser colhida. Para o setor energético, produção de carvão vegetal, o Sistema de Árvores Inteiras torna-se favorável pela alta produtividade a um custo relativamente baixo. Para celulose a utilização do Sistema de Toras Curtas é predominante, o qual embora tenha um custo maior que o de toras longas, entrega um produto de melhor qualidade (madeira descascada).

Outro fator que interfere na escolha do sistema são as dinâmicas operacionais da própria empresa, que pode ter demandas específicas sobre a matéria-prima (madeira) que deve chegar à fábrica. Como exemplo pode-se citar a CENIBRA S.A., uma empresa de celulose que depende do descascamento de parte da madeira no pátio para o aproveitamento da casca na geração de energia (SEMAD, 2015). Neste caso a madeira com casca pode ser colhida tanto no Sistema de Toras Curtas como no de Árvores Inteiras.

Para a escolha de qual sistema utilizar e quais máquinas adquirir devem ser realizados estudos detalhados sobre custos e rendimentos, infraestrutura de assistência técnica dos fornecedores e treinamento dos operadores. De acordo com as condições do local, pode haver uma combinação de atividades manuais e mecânicas dentro de um mesmo sistema. A escolha mais adequada é aquela em que o sistema e o método venham atender aos requisitos técnicos, ergonômicos e ambientais (MALINOVSKI *et al.*, 2014; SANCHES, 2014).

3.2.1.1 Sistema de Toras Curtas (*Cut to length* – CTL)

Malinovski *et al.* (2014) apresentam o sistema de toras curtas como o mais antigo sistema de colheita utilizado no Brasil e o principal nos países escandinavos. Ele consiste em processar a árvore no interior do talhão e baldeá-la até a margem da estrada ou para o pátio temporário em forma de toras com no máximo 7 metros de comprimento.

Este sistema tem a vantagem de ser aplicado com baixo grau de mecanização em operação de colheita manual ou semimecanizada. Outro fator positivo é a tendência de gerar baixo impacto negativo no meio ambiente mesmo quando utilizado equipamentos mais

modernos e máquinas de grande porte (MALINOVSKI *et al.*, 2014). Isto ocorre devido aos resíduos deixados no campo após a operação e ao deslocamento da máquina não ser em área total, mas sim em uma única trilha em cada eito.

Quando mecanizado, as principais máquinas utilizadas são os *Harvesters* e os *Forwarders*. Autocarregáveis e *Skidders* de cabo também podem ser utilizados dependendo do interesse da empresa (MALINOVSKI *et al.*, 2014).

Malinovski e Malinovski (1998) apontam como desvantagem o descarte dos galhos, tocos e folhas que poderiam ser utilizados como energia. Porém este fato proporciona ganho ambiental para o sistema, por intermédio da ciclagem de nutriente e proteção do solo.

São muitos os fatores que interferem na produtividade destes sistemas. Machado e Lopes (2000) apresentam o comprimento da tora como sendo um destes. Estes autores citam que a mudança no comprimento da tora de cinco (5) para seis (6) metros pode significar um aumento da produtividade em 14,6% a 15,9% nas condições por eles estudadas.

3.2.1.2 Sistema de toras longas (*Tree-length*)

Sistema de origem norte americana no qual a árvore é semiprocessada no interior do talhão onde pode ocorrer além do desganhamento, o destopamento e o descascamento. O que diferencia este sistema do CTL é o tamanho mínimo do fuste, enquanto no CTL o máximo é 7 metros, neste, são acima de 7 metros. Após o semiprocessamento os fustes são transportados até a margem da estrada ou pátio temporário, onde podem ser traçadas ou transportadas (MALINOVSKI *et al.*, 2014). Balle (2012) relata que este é o sistema mais utilizado na Alemanha em terrenos acidentados.

Malinovski *et al.* (2014) consideram este como um sistema de baixo custo quando mecanizado. As principais máquinas são os *Harvesters*, *Skidders*, *Slashers*, Garra Traçadoras e até mesmo os *Feller-bunchers*. O semiprocessamento pode ocorrer de forma manual, com motosserra ou motopoda, ou mecanizado com o *Harvester* ou com outras máquinas, ao exemplo do desganhador florestal. A atividade do desganhador florestal tem sido polêmica, algumas empresas consideram sua operação no interior do talhão como fazendo parte do sistema de Árvores Inteiras, enquanto que pela definição da FAO (1978), material que gerou as definições presentes em Machado (2014), pode ser interpretado como de toras longas.

3.2.1.3 Sistema de árvores inteiras (*Full-tree - FT*)

É um dos sistemas mais utilizados no Brasil e, também, tradicionalmente por empresas americanas. Nele a árvore é abatida e arrastada até a margem da estrada ou pátio provisório, onde então será processada (MALINOVSKI *et al.*, 2014). Este sistema requer elevado grau de mecanização e pode ser utilizado em qualquer tipo de terreno (RODRIGUES, 2018).

O FT pode ser conduzido com diferentes tipos de modais, sendo que o arranjo das máquinas deve ser escolhido de forma bem criteriosa. Em áreas de topografia plana a ondulado, onde permite o deslocamento seguro de máquinas o modal mais praticado é composto pelo *Feller-buncher*, *Skidder* e Garra Traçadora. Em locais mais acidentados o uso de motosserras, cabos aéreos o *Shovel Logger* pode ser o mais indicado. Porém para Malinovski *et al.* (2014) e Rodrigues 2018, existe uma gama muito diversificada de máquinas que podem ser empregadas neste sistema.

Segundo Malinovski *et al.* (2014), grandes empresas do Brasil utilizam este sistema pelo seu baixo custo e alta produtividade, principalmente nas atividades de corte raso.

O FT por exigir um grau mais elevado de mecanização, também exige uma maior eficiência no planejamento com o propósito de reduzir os custos e impactos da colheita. Durante a execução das operações os impactos ambientais negativos gerados tendem a ser superiores ao CTL, principalmente pela exposição do solo, acúmulo excessivo de resíduo nas bordas e maior compactação.

3.2.1.4 Sistema de Árvores Completas (*Whole-tree*)

Sistema pouco utilizado que consiste na retirada da árvore com parte de seu sistema radicular. Após a derrubada, ela é levada até a margem da estrada ou pátio provisório, onde então será processada (MALINOVSKI *et al.*, 2014).

Rodrigues (2018) classifica este sistema como altamente impactante para o ambiente, por que além de remover quase toda a biomassa do local, não contribuindo com a ciclagem de nutrientes, também revolve e expõe o solo.

Este sistema pode ser uma opção para quando se deseja realizar supressão florestal e posterior limpeza de área e preparo do solo para recebimento de nova cultura, principalmente grãos agrícolas em larga escala, que requer um solo livre de resíduos como as raízes mais grossas.

3.2.1.5 Sistema de Cavaqueamento (Chipping)

Segundo Malinovski *et al.* (2014) corresponde a um sistema em que a árvore é abatida e processada no próprio local, sendo levada em forma de cavacos até o pátio de estocagem ou diretamente para a unidade fabril. O processamento pode ocorrer dentro do talhão ou na borda.

Rodrigues (2018) aponta como vantagem para este sistema a oportunidade de se aproveitar 100% do material lenhoso, além de eliminar várias sub-operações da colheita florestal. Porém pode exigir um grande investimento inicial em equipamentos.

Embora ainda pouco utilizado este sistema tem potencial para se posicionar entre os principais no Brasil. Com o mercado de biomassa em expansão ele tende a ser uma alternativa atrativa pela praticidade no processamento e transporte da matéria-prima.

3.2.2 Skidder

Este trator florestal normalmente está associado a operação de extração após a colheita com o *Feller-buncher*. Machado *et al.* (2014) e Lima e Leite (2014) o definem como uma máquina projetada para arrastar feixes de fustes do interior para a borda do talhão. Quanto a seus rodados, podem ser de esteira (Figura 2) ou de pneus (Figura 3), podendo ainda ser de garra ou com sistemas de cabo de aço.



Figura 2: *Skidder* com rodados de esteira.

Fonte: Peterson cat.



Figura 3: *Skidder* com rodados de pneu.

Fonte: Tigercat.

É uma máquina desenvolvida para suportar o hostil terreno da colheita florestal pós a atividade de corte. Embora seja uma máquina com grande tecnologia embarcada, é relativamente de fácil operação e manutenção, podendo ser considerada a mais simples dentre as máquinas destinadas à colheita florestal. Devido sua agilidade e produtividade é uma das máquinas mais utilizadas na extração de madeira no Brasil, tanto em áreas de florestas plantadas como nativas (FREITAS *et al.* 2009). É uma máquina que apresenta alto custo

operacional e, fatores externos como relevo, limitação de bordas para arraste e irregularidade do talhão podem interferir negativamente na sua produtividade.

Para a extração de madeira no Brasil são utilizadas principalmente duas máquinas, o *Skidder* e o *Forwarder*, cada uma destinada a um sistema de colheita. Outras máquinas e métodos de extração são pouco significativos. Ao contrário do *Skidder* que arrasta feixes de árvores inteiras do interior do talhão para a borda, o *Forwarder* transporta toras de madeira, já processadas pelo *Harvester*, de dentro do talhão para a borda ou pátio (MACHADO *et al.*, 2014; LIMA & LEITE, 2014; SEIXAS e CASTRO, 2014.). O *Forwarder* tem sua aplicação mais consolidada nos processos de colheita das indústrias de celulose, onde o Sistema de Toras Curtas (*Cut to length*) apresenta maior viabilidade (LIMA & LEITE, 2014; SEIXAS e CASTRO, 2014). Esta máquina é a mais utilizada na principal linha da indústria florestal do país (indústria de celulose), por este motivo encontra-se maior quantidade de publicações comparado ao *Skidder*.

Lima e Leite (2014), Seixas e Castro (2014) e outros autores apontam a distância de deslocamento, também chamada de distância de extração ou distância média de extração (DME), a declividade, a produtividade do povoamento e, também, outros fatores como variáveis responsáveis pelo aumento do custo operacional do *Skidder*. Mesmo tendo conhecimento destas variáveis, a maioria dos trabalhos sobre a operação com o *Skidder* em plantios florestais trata de avaliação econômica, ergonômica e de compactação de solo.

A DME é a principal variável que afeta os custos de operação com o *Skidder*, ou seja, quanto menor a rota, menor será o valor gasto por m³ de madeira arrastada (MIYAJIMA *et al.*, 2016; LIMA; LEITE, 2014; AKAY *et al.*, 2004). Lima e Leite (2014) destacam que todo o desempenho operacional desta máquina é afetado por esta variável. Esta afirmação é respaldada por outros trabalhos científicos, onde a distância de extração está diretamente ligada ao custo total da operação. Trabalhos mais antigos, como o do Akay *et al.* (2004), já relacionava o custo operacional do *Skidder* com sua distância de extração, sendo que quanto maior esta distância mais inviável economicamente a atividade se torna.

Miyajima *et al.* (2016) verificaram que a produtividade média do operador relacionado a distância de extração em terreno plano variou de 150 m³/h a 25 m e, 66,86 m³/h a 225 m e, com isso, quanto menor a distância maior a produtividade, dados respaldados por Fernandes *et al.* (2009) e Lopes *et al.* (2009). Miyajima *et al.* (2016) determinaram o custo operacional da máquina em R\$ 377,10 por hora, custo este que não é alterado pela DME e

nem pelo número de ciclos realizados. Já o custo de produção variou de R\$ 2,51 a R\$ 5,63 por m³ arrastado, sendo diretamente afetado pela DME.

A altura da pilha formada pelos feixes de madeiras arrastados pelo *Skidder* é outro aspecto a ser considerado, principalmente em florestas de alta produtividade. Por questões de segurança e limitação mecânica, empresas estipulam a altura máxima aceitável para o empilhamento destes feixes.

No arraste com o *Skidder*, o uso de pilhas mais baixas possíveis facilita a secagem desta madeira em campo, sendo esta prática preferencial das empresas que visam a produção de carvão. Um fator que pode afetar a altura da pilha é a limitação de distribuição da madeira em todo o perímetro do talhão, elegendo assim uma ou mais bordas viáveis.

As bordas viáveis são as localizadas margeando as estradas utilizadas no processo de transporte (retirada da madeira do campo para o pátio de destino). Em alguns casos podem haver limitação de tráfego por questões ambientais, ou no empilhamento por questões de segurança, como próximo a barrancos. Em situações como estas é imprescindível manter a homogeneidade da distribuição dos feixes para a formação das pilhas.

A homogeneidade na distribuição dos feixes de madeiras nas bordas garantirá uniformidade nos padrões de umidade da madeira em campo, além de manter regularidade nas pilhas processadas, principalmente em madeiras destinadas àquelas Unidades Produtoras de Carvão (UPC) que requerem bitolas reduzidas.

Se o objetivo é reduzir a DME outras variáveis no campo devem ser consideradas. Seixas e Castro (2014) enumeram vários elementos que influenciam no processo de extração da madeira, dentre eles estão a densidade do talhão, tipo de solo e volume por árvore. Variáveis estas que podem sim interferir na produtividade da máquina, porém não são tão representativas na otimização da rota. A variável mais significativa citada por estes autores é a declividade, pois esta influencia diretamente na DME em terrenos mais acidentados, obrigando o operador a percorrer caminhos que respeitem a segurança na operação.

Embora grande parte dos *Skidders* de pneus possam operar em declividade de até 33,2% (LIMA & LEITE, 2014), Lopes *et al.* (2007) definiu em seu trabalho que o uso de semi-esteiras nos pneus do *Skidder* permite a máquina operar no sentido da declividade em áreas superiores a 20% e inferiores a 30% que é o limite aceitável pelos padrões de segurança da empresa estudada e, a falta deste equipamento limita a operação desta máquina a áreas com até 20% de declividade.

Com relação ao sentido do deslocamento, Seixas e Castro (2014) recomendam que em declividades superiores a 10% e inferiores a 30% as rotas de extração devem acompanhar o declive, sendo permitido rotas paralelas a declividade somente em áreas inferiores a 10%.

A calibragem correta dos pneus é outro fator que pode interferir na velocidade da extração e na ergonomia do operador, embora não interfira na DME. O erro na calibragem pode aumentar ou reduzir o atrito dos rodados da máquina no deslocamento, ocasionando a redução ou aumento do índice de patinagem e vibração da cabine.

3.2.3 Planejamento das operações de colheita florestal

Para que a atividade da colheita florestal seja bem executada diversos fatores devem ser considerados. Essa atividade é uma das mais onerosas entre as atividades florestais de uma empresa de produção e exploração de madeira. Assim, o custo é um fator muito importante a ser estudado e reduzido. Mas não somente o custo deve ser estudado, outros fatores também como a manutenção mecânica, os impactos ambientais da colheita, a qualidade total da atividade, a ergonomia aplicada ao trabalho, dentre outros devem sofrerem interferências no momento adequado. Todas estas questões devem ser planejadas antecipadamente e/ou previstas para que medidas de precaução sejam tomadas.

Para Sant'Anna (2014) o planejamento da colheita florestal deve ser iniciado com muita antecedência a sua execução, devendo levar em consideração a minimização dos custos, a otimização dos rendimentos e a redução dos impactos ambientais. Mesmo planejado com antecedência, durante as atividades que envolvem a colheita florestal, o operador deve estar sempre atento e constantemente planejando sua atividade, pensando nas operações subsequentes.

O planejamento da colheita florestal é realizado conforme a necessidade e peculiaridade de cada empresa, sendo indispensável para a sobrevivência em longo prazo de qualquer organização empresarial. Infelizmente devido ao alto custo das atividades de colheita, a maioria das empresas optam por priorizar aspectos técnicos e econômicos na hora das tomadas de decisão no planejamento. Porém, aspectos ambientais e sociais são importantes também para realizar um planejamento eficiente que se apoie nos pilares da sustentabilidade (MACHADO e LOPES, (2014).

Estes autores dizem que para entender melhor o processo do planejamento é necessário dividi-lo em duas classes temporais, o planejamento de curto prazo para problemas bem estruturados e, o planejamento de longo prazo para problemas com maior grau de incertezas. Os métodos mais utilizados para o setor florestal são o interativo, o de tentativa e o científico, sendo que neste último são utilizadas técnicas da ciência operacional para compreender as situações reais com dados coletados em campo.

O planejamento da colheita florestal pode ser subdividido em três níveis hierárquicos, conforme Machado e Lopes (2014), a saber:

- Planejamento estratégico: consiste em planejar a colheita em um horizonte de planejamento mais longo, normalmente acima de 10 anos. Está ligado aos objetivos gerais da organização, tanto de produtividade como de crescimento ao longo dos anos. A tomada de decisão nesta etapa de planejamento deve ser muito cautelosa e pode ser auxiliada pelo uso de técnicas da pesquisa operacional.
- Planejamento gerencial: algumas empresas divide este planejamento em macroplanejamento e microplanejamento. O macroplanejamento está ligado ao projeto que será explorado em um determinado período. Deve identificar cada talhão bem como a sequência de corte, as rotas a serem percorridas entre outros fatores. O microplanejamento trabalha em nível de talhão e tem o objetivo de identificar e marcar os eitos de corte, estabelecer as rotas de extração e identificar áreas de risco.
- Planejamento operacional: nível hierárquico mais baixo do planejamento. Visa antecipar os problemas e estabelecer rotinas e alternativas operacionais que levem ao cumprimento das metas de produção preestabelecidas. Pode ser executado por um supervisor, um encarregado ou por alguém que possua conhecimento detalhado da área em campo e da atividade a ser realizada.

3.3 Pesquisa operacional (PO)

Após a Revolução Industrial o mundo acompanhou o grande salto no tamanho e complexidade das organizações, bem como a transformação de algumas pequenas empresas em corporações gigantescas. Este extraordinário aumento teve como fator crucial a divisão de trabalho e a segmentação das responsabilidades gerenciais nestas organizações. Em contrapartida a este crescimento surgiram novos problemas como, por exemplo, a dificuldade em se alocar os recursos disponíveis para realização das atividades de forma eficiente. A

necessidade de encontrar soluções viáveis e o melhor caminho para solucioná-las criou as condições necessárias para o surgimento da Pesquisa Operacional (PO) (HILLER; LIEBERMAN, 2010).

A PO envolve a criação de metodologias específicas para promover o gerenciamento de decisões (PIZZOLATO; GANDOLPHO, 2009). Pode-se dizer que é uma ciência recente, tendo surgido entre 1939 e 1940 nas Forças Armadas do Reino Unido (PINTO, 2005). Nesta época seu principal foco era resolver problemas nas operações militares durante a Segunda Guerra Mundial (RABENSCHLAG, 2005).

Pouco tempo após, na década de 50, várias ferramentas da PO consideradas padrões encontravam-se bem desenvolvidas. A exemplo destas pode-se citar a programação linear, a programação dinâmica, teoria das filas e a teoria do inventário (HILLER; LIEBERMAN, 2010).

O principal objetivo da PO é auxiliar na tomada de decisão. Sua aplicação pode corresponder a uma simples rota traçada em um GPS de navegação, como também fazer parte de todo o planejamento de uma grande organização. No século XXI a PO está presente em todas as grandes empresas, nas estratégias do governo e, até mesmo, faz parte do dia a dia da maior parte da população, nas decisões mais básicas do cotidiano.

Há inúmeros relatos na literatura ressaltando sua importância nas reduções de rotas, custos de produtos e serviços.

Hillier e Lieberman (2010) citam vários destes exemplos. No setor de logística da *Sears, Roebuck and Company*, rede de loja de departamentos desenvolveu em 1999 um sistema de programação e roteamento de veículos para as frotas de entrega e de atendimento domiciliar, com isto estimou uma economia de 42 milhões de dólares por ano. A *Continental Airlines* economizou 40 milhões de dólares em 2003 ao otimizar a realocação de tripulantes em decorrência de desajustes nos horários de voos.

Estes autores citam também experiências governamentais como no caso da China que economizou em 1995, aproximadamente 425 milhões de dólares otimizando projetos para atender as necessidades futuras de energia. A Força de Defesa da África do Sul que economizou 1,1 bilhão de dólares redesenhando, de forma otimizada, o tamanho e o formato das forças de defesas e seus sistemas de armamentos. Mas, a maior parte dos exemplos de aplicação da PO vêm de empresas como a IBM com economias superiores a um bilhão de dólares, a *Samsung Electronics* que ao desenvolver métodos de redução de tempos de

fabricação e níveis de estoque obtiveram uma receita de 200 milhões de dólares a mais por ano, além de muitas outras empresas em diversas áreas e demandas.

Para atingir estes objetivos a PO possui vários métodos que possibilitam encontrar pontos ótimos, ou quando necessário, encontrar soluções viáveis. Dentre estes métodos pode-se citar a Programação Dinâmica (PD) e Heurística.

Uma das atividades mais clássica e muito difundida na literatura para aplicação da PO é a roteirização de veículos com o objetivo de definir uma rota e reduzir custos (KRAMER *et al.*, 2016)

Lachtermacher (2009) ao tratar do problema de transporte, bem como os demais modelos de redes por intermédio da programação linear define que eles serão melhor analisados, por meio de uma representação gráfica. Porém, em algumas situações quando estes problemas requerem um grande número de restrições e variáveis e, a geração de um modelo matemático que melhor o defina seja muito complexo e de grande custo computacional para sua resolução, a utilização de heurísticas pode ser o caminho mais favorável.

3.3.1 Aplicação no Setor Florestal

São muitas as aplicações da PO em todos os setores econômicos, desde os governamentais, produtivos, ambiental, tecnológicos, entre outros. Portanto, o setor florestal se utiliza também das benesses ofertadas pelas ferramentas da PO.

Segundo Dantas e Andreoli (2017), o setor está passando por uma grande “revolução florestal”, demandando de muitas inovações e avanços tecnológicos. Nesse sentido, enormes investimentos em maquinário de alta tecnologia que aliam as vantagens econômicas, ambientais e ergonômicas constitui prova de que as empresas do setor estão dispostas a se inserirem em um novo patamar tecnológico, comumente chamado de “Floresta 4.0” (ABREU *et al.*, 2019). No entanto, sabe-se que somente estes investimentos não trarão os resultados esperados para a empresa, pois por trás de todas estas tomadas de decisões deverá se ter sempre, um bom planejamento.

Buogiorno e Gilles (2003), consideraram que o planejamento da sequência de atividades futuras a serem realizadas na área florestal é essencial para o desenvolvimento do projeto, sendo a PO uma ferramenta de apoio às tomadas de decisões necessárias para se alcançar os objetivos almejados. Abreu *et al.* (2019) corroboram com estes autores ao afirmar que as inovações do setor não se restringem a aquisições de máquinas, pois os setores que

mais tem sofrido transformações são os administrativos, estruturais e de apoio operacional, tendo como objetivo todo planejamento da atividade e acompanhamento em tempo real. Para estes autores o que permite isso acontecer é a visibilidade que empresas de *softwares* e os fornecedores de máquinas estão dando para a digitalização das informações, das operações e suas transmissão em tempo real, permitindo um monitoramento por intermédio de IoT (Internet das Coisas).

Pode-se dizer que IoT consiste em se interligar um conjunto de objetos para que eles se comuniquem entre si (AYRES; SALES, 2010). Graças ao nível tecnológico atual, não é difícil se visualizar a aplicação da IoT partindo do pensamento de Dourish (2006) que, considera o mundo tecnológico incrustado no mundo físico, sendo então capaz de fornecer novos modos de compreendê-lo e aprimorá-lo. Desta forma a IoT permite esta ligação entre o tecnológico e o físico conforme concluído por Beckel *et al.* (2012) e Guinard (2011).

Com o uso da IoT, a telemetria e a PO aplicada por meio da plataforma SAP, apresentou ganhos qualitativos como o monitoramento em tempo real das máquinas e agilidade nas manutenções. Houve também ganhos quantitativos, como o aumento de 6.3% na produtividade dos equipamentos, 1 % na eficiência operacional e redução de mais de 20 mil horas por ano das máquinas com motor ligado sem necessidade.

Assim, como no exemplo acima existem numerosas pesquisas que se utilizam da pesquisa operacional para otimizar atividades e auxiliar nas tomadas de decisão na gestão florestal. Órgãos públicos e indústrias privadas tem utilizado amplamente a PO como suporte a indústria florestal.

Frisk *et al.* (2010) demonstram que mais do que auxiliar no planejamento interno de uma empresa, a PO pode reduzir significativamente os custos como no caso dos autores o custo de transporte, quando há colaboração entre empresas próximas. Neste estudo eles utilizam a programação linear para demonstrar que um bom planejamento das rotas em duas empresas, que possuem duas unidades de processamento cada, conseguiu-se reduzir os custos em aproximadamente 5%. Porém quando houve cooperação entre estas empresas a redução dos custos de transportes atingiu até 14,2%. Além da economia monetária, esta cooperação ainda permitiu reduzir a emissão de poluentes dos caminhões estimada em 20%.

Rönnqvist (2003) apresentou uma série de problemas típicos de planejamento referentes à indústria florestal, com comentários sobre o tempo necessário para resolver cada um desses problemas. Ele observou que, enquanto problemas de planejamento operacional geralmente precisam ser resolvidos rapidamente, em segundos ou minutos, problemas de

planejamento estratégico podem ser resolvidos por um longo período de tempo, às vezes muitas horas. Por esta razão ele recomenda heurísticas como métodos possíveis de serem utilizados para problemas de planejamento operacional, enquanto a Programação Inteira Mista (MIP) e os métodos de programação estocástica são melhores para os problemas de planejamento estratégico.

Muitos outros trabalhos podem ser utilizados para exemplificar o uso da PO no setor florestal, como o de D'Amours *et al.* (2008) que trataram de uma revisão sobre PO, fazendo um apanhado geral sobre a cadeia de suprimentos do setor florestal no Canadá. E o de Jena *et al.* (2015) que utilizaram a Programação Inteira Mista para fazer a distribuição dos acampamentos para os madeireiros, em uma empresa do Canadá. Estes autores chegaram à conclusão de que para a maioria dos casos simulados há um custo computacional muito grande e a necessidade de utilização de técnicas mais sofisticadas, como a decomposição matemática.

Até mesmo em operações aparentemente simples como o deslocamento para se chegar em parcelas de um inventário florestal pode ser otimizado pela PO. Marcatti (2013) demonstrou em seu trabalho que o caminho otimizado pode ser 17% menor que o intuitivo dos profissionais, para a situação estudada.

Existem também muitos trabalhos publicados que envolvem o tema ao setor florestal. Rönnqvist *et al.* (2015) e Scholz *et al.* (2018) publicaram revisões de literatura sobre a aplicação da PO neste setor, abrangendo uma grande quantidade de problemas possíveis de serem resolvidos dentro da cadeia de suprimentos florestal, englobando diversas possibilidades de pesquisa, soluções existentes e tendências para trabalhos futuros.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em ambiente virtual simulado, com condições próximas as reais encontradas em campo, de um talhão retangular homogêneo e com feixes posicionados para arraste. Feita a simulação do ambiente desenvolveu-se um algoritmo para determinar a rota a ser percorrida pelo *Skidder*. Com o objetivo de comparar a simulação ao deslocamento real, todo o deslocamento de um *Skidder* em campo foi coletada em um ambiente com características semelhantes as da área simulada.

O processo de definição da rota de deslocamento do *Skidder* foi subdividido em três etapas. A primeira consistiu na criação de um ambiente simulado para ser utilizado no traçamento das rotas. A segunda consistiu em identificar e solucionar problemas de restrições na área simulada para que o algoritmo encontre uma solução viável, sendo estas restrições resolvidas com base em superfícies de custos definidas para a área. A terceira etapa consistiu em executar o algoritmo do Vizinho Mais Próximo adaptado para encontrar uma rota viável.

4.1 Definição do problema

A operação com o *Skidder* é uma atividade que demanda planejamento para garantir o cumprimento das exigências da empresa quanto à disposição da madeira arrastada até as bordas dos talhões. Muitas vezes este planejamento está a cargo do operador o qual, além de executar as atividades do ciclo operacional tem de definir as rotas a serem percorridas em campo e a disposição dos feixes de madeira nas pilhas das bordas do talhão.

Algumas restrições podem ser impostas nesta atividade, como altura máxima da pilha, homogeneidade na distribuição dos feixes ao longo das bordas dos talhões, presença de locais específicos para o arraste, ou bordas indisponíveis, presença de obstáculos, limitações do terreno, entre outros fatores. Mediante a ocorrência destas restrições, o planejamento da distribuição desta madeira pelo operador pode resultar em uma DME superior a definida por um planejamento *ex situ*.

O problema proposto consistiu em se planejar a rota para um *Skidder* em um talhão homogêneo, sem obstáculos e com a possibilidade de distribuição da madeira em todas as bordas. A única restrição referente ao talhão e a disposição da madeira considerada foram as distâncias de segurança nas quinas do talhão e um intervalo entre as pilhas para prevenção

de incêndio. Estas medidas serão descritas na simulação da área, bem como outras restrições referentes à operação.

Outras restrições da operação e do deslocamento da máquina podem aparecer no decorrer da solução do problema. Restrições para problemas pontuais ou gerais da operação, como os encontrados neste problema que foram: o deslocamento sobre pilha e o deslocamento carregado em marcha ré.

4.2 Definição de rota de deslocamento

A definição de uma rota viável necessita de variáveis de entrada com alguns dados de campo. Para este trabalho estas variáveis foram simuladas, sendo criado um ambiente virtual com a delimitação da área (talhão ou parte deste) e os feixes de madeiras dispostos a um espaçamento próximo ao real.

O procedimento foi desenvolvido utilizando linguagem computacional Python em um *notebook* com 8 Gb de memória RAM, placa de vídeo NVIDIA GEFORCE 920M com 2 Gb de memória dedicada e processador i5-5200U de 2.20 GHz.

4.2.1 Simulação de um ambiente virtual

A rota a ser percorrida pelo *Skidder* foi definida a partir de uma área simulada com dimensões e características próximas as reais.

Com a finalidade de iniciar o traçamento de rota para o *Skidder* foi selecionado um talhão com 50 hectares (ha), sendo suas dimensões 1000 x 500 metros, variando o relevo entre plano a ondulado. A área simulada é um retângulo que possui dimensão de 12,5 ha, o que corresponde a 25% deste talhão modelo. As medidas adotadas foram de 250 metros no sentido horizontal e 500 metros na vertical. O alinhamento de plantio considerado foi no sentido horizontal.

Pressupôs-se que a colheita foi realizada com o *Feller-buncher* com feixes basculados a 90° e distanciados 16 metros entre si, sendo alternado com a passada da máquina no próximo eito (faixa), também espaçado em 16 metros (Figura 4).

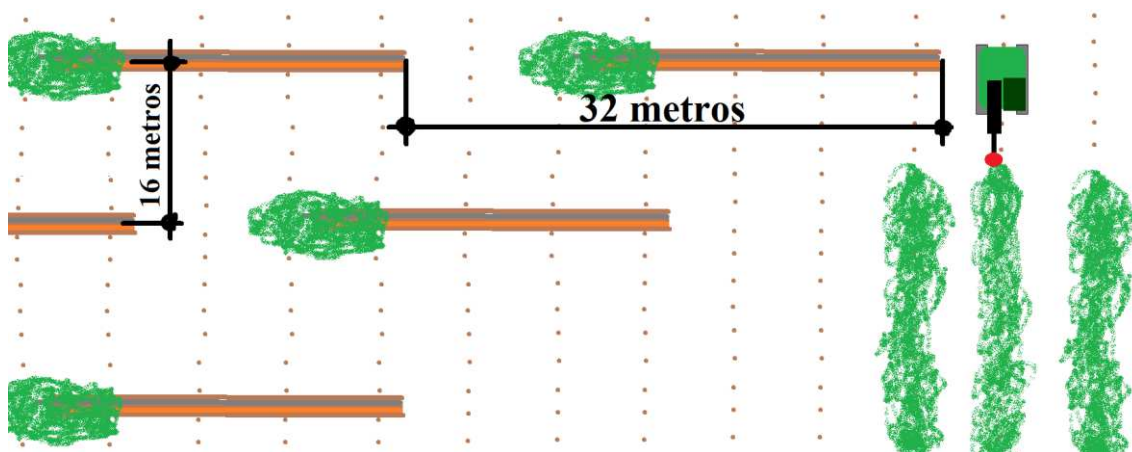


Figura 4. Esquema definido para a colheita com o *Feller-buncher* na área simulada.
Fonte: Próprio autor.

A área foi considerada como uma porção fragmentada de uma possível área de 50 ha, tendo portanto duas bordas viáveis para disposição da pilha de toras e duas bordas limítrofes ao interior do talhão. Desta forma, a atividade simulada pode ser considerada como uma subdivisão da área total, podendo ser espelhada para todo o talhão, permitindo assim a operação simultânea de mais máquinas.

O ambiente simulado e os dados foram inicialmente modelados no *software* de SIG QGIS versão 2.18.20. Foram criados três vetores do tipo grade vetorial para simular uma área de 250 X 500 metros: uma grade de 2 x 2 metros para simular o terreno e duas grades intercaladas em 16 x 32 para simular os feixes (Figura 5). Também foram definidos os locais possíveis para alocação das pilhas nas bordas do talhão, respeitando uma distância de segurança de 30 metros nas esquinas e distância de prevenção de incêndios de 10 metros a cada 90 metros de pilha. As pilhas foram transformadas em *raster* considerado os *pixel* de 2 x 2 como um ponto na pilha e com a possibilidade de receber dois feixes.

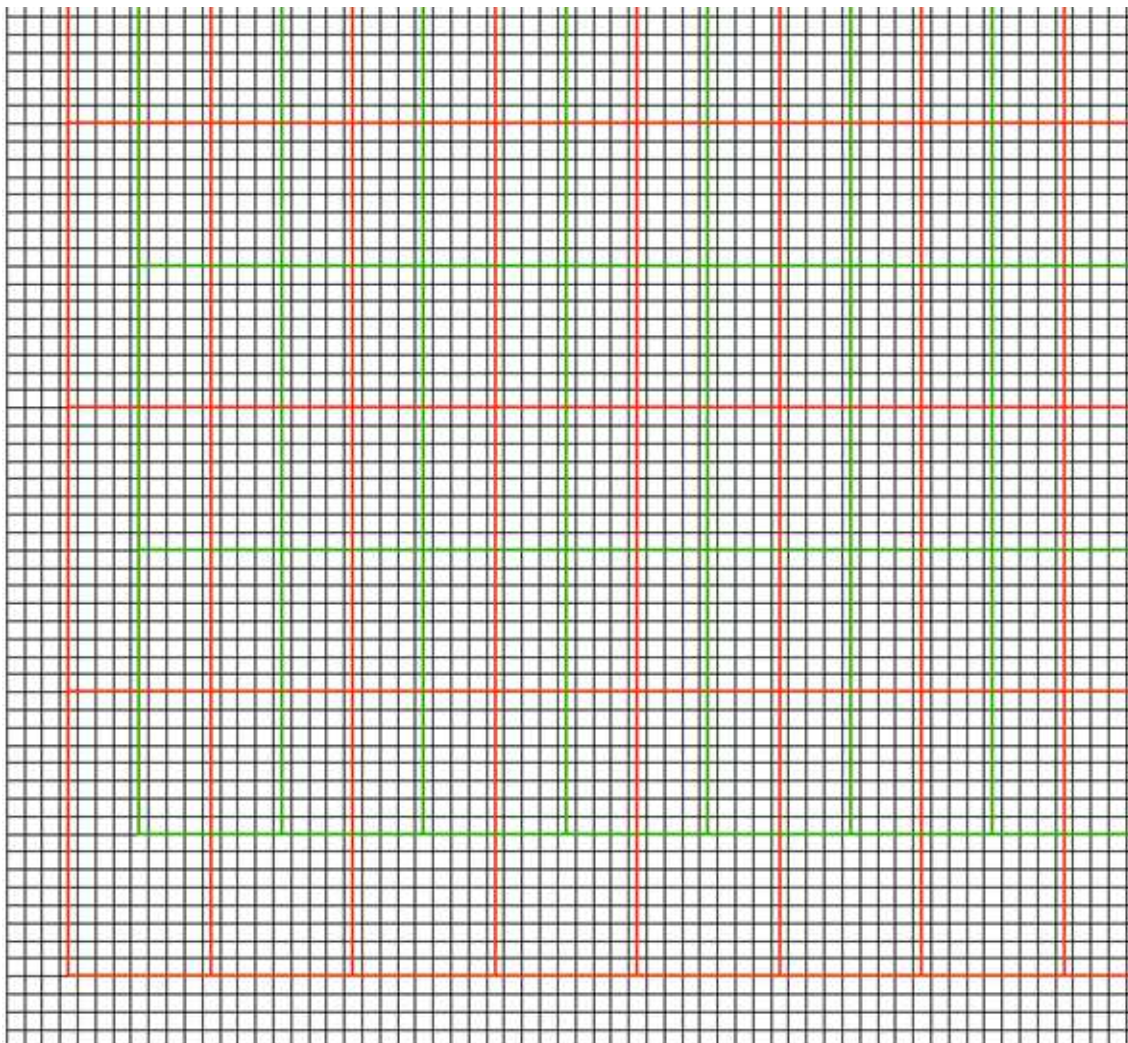


Figura 5. Fragmento dos vetores gerados para a simulação da área.

Fonte: Do próprio autor.

Os dados da grade vetorial foram convertidos de *shapefile* para *raster* com uma resolução espacial de 2 x 2 metros em arquivos no formato .tif. Os *rasters* gerados para serem as variáveis de entrada estão apresentados na figura 6.

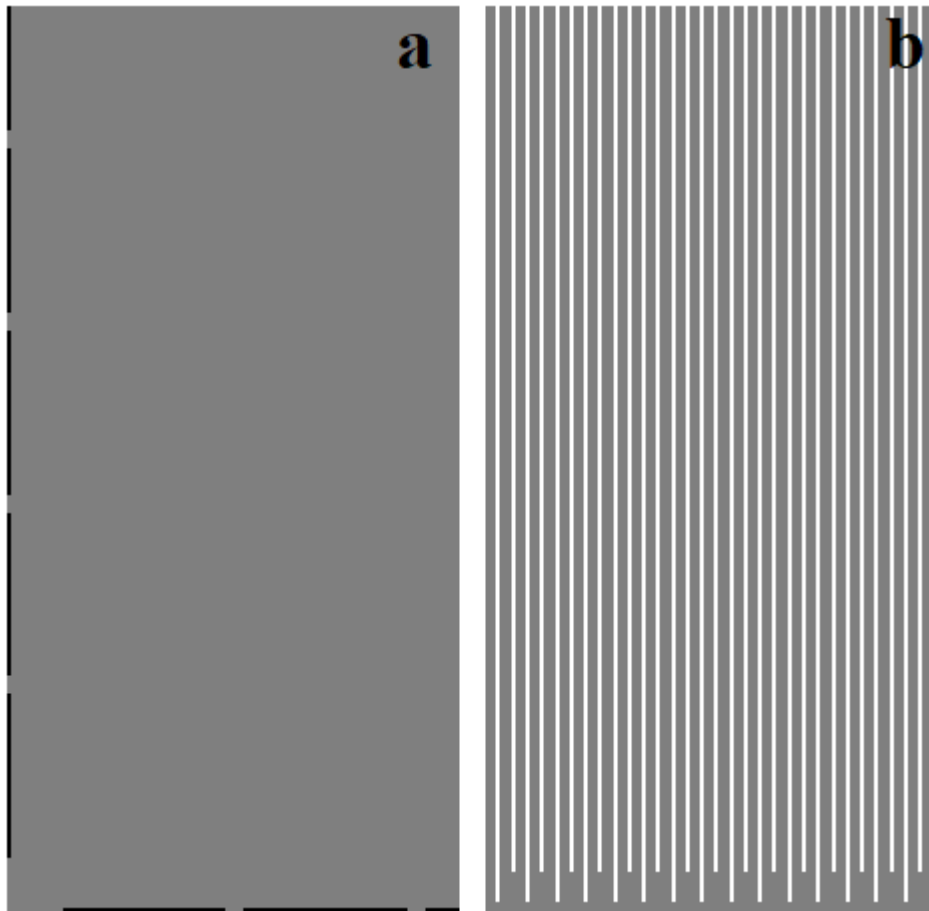


Figura 6: Representação das pilhas (a), em vermelho e, dos feixes (b), em branco, da área simulada.

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que na simulação não há distinção entre os feixes, sendo cada fileira de feixes representada por uma linha contínua. A delimitação destes feixes é um dos passos importantes para a busca por rotas viáveis pelo algoritmo, pois permitirá identificar quais feixes e quantos ainda estão disponíveis para arraste.

Para delimitar onde se inicia os feixes em cada coluna foi utilizado a convolução. Desta forma foi possível determinar qual *pixel* possui o valor referente à base do primeiro feixe de cada coluna (Figura 7).

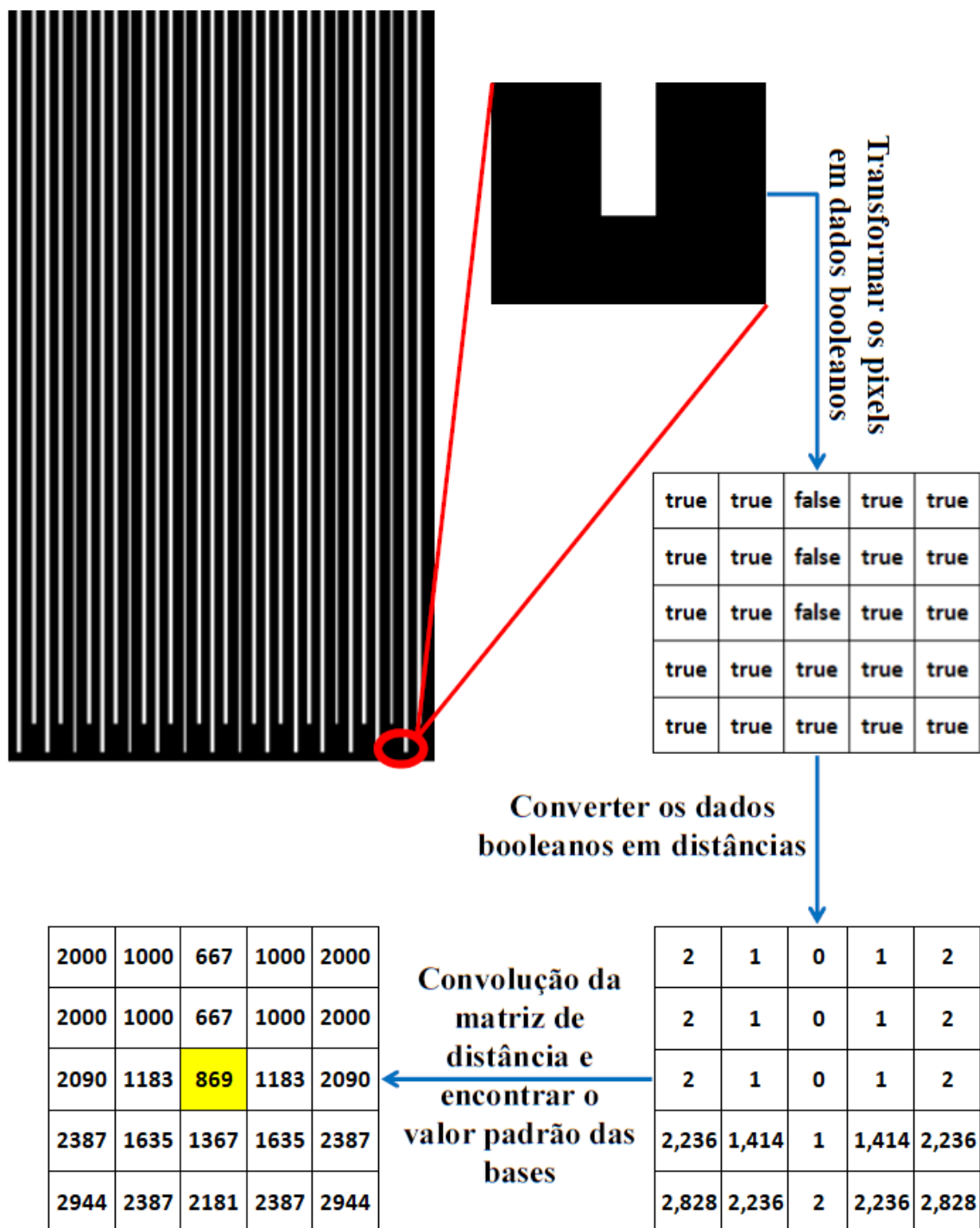


Figura 7: Identificação da base dos primeiros feixes de cada coluna por meio de convolução.
Fonte: Próprio autor.

A geração deste resultado demonstrado na figura 7 deu-se com a importação da figura 6(B) e sua transformação em uma matriz binária de valores um (1) para as colunas de feixes e zero (0) para os demais *pixels*. Com o objetivo de identificar a distância euclidiana de cada *pixel* da coluna de feixes mais próxima, esta matriz binária foi transformada em uma

matriz de dados booleanos. Para se chegar ao resultado esperado para a distância foi utilizado o comando *distance_transform_edt* da biblioteca *scipy.ndimage*.

A matriz com os valores das distâncias euclidianas foi transformada em uma matriz de convolução a partir de uma janela de 3X3 onde o *pixel* central recebeu o valor da média da somatória da matriz de entrada vezes 1000.

Os dados fornecidos pela matriz de convolução demonstraram que todos os *pixels* que formam a base do primeiro feixe de cada coluna recebem o mesmo valor. Desta forma eles foram selecionados como a base para a determinação dos demais feixes existentes dentro do talhão.

A localização dos demais feixes foi realizada com base nos valores adotados para a área simulada. Foi estipulado que cada feixe a ser arrastado estão equidistantes 16 metros entre si e possuem 32 metros de comprimento. Portanto, cada feixe ocupa 32 metros na coluna a qual pertence, sabendo-se que cada *pixel* possui 2x2 metros, cada feixe deve ocupar 16 *pixels*. A base do feixe já é um *pixel*, portanto conta-se mais 15 e demarca outra base de feixe e, assim, sucessivamente até o final da coluna. O resultado pode ser visualizado na figura 8.

Para a área simulada esta foi uma alternativa para se determinar a base dos feixes, porém em uma área real outras metodologias podem ser utilizadas futuramente. Como exemplo destas metodologias pode-se citar o reconhecimento de padrões de imagens aéreas, sensores acoplados ao *Feller-buncher* ou, até mesmo, a demarcação manual em campo ou por intermédio de imagens georeferenciadas.

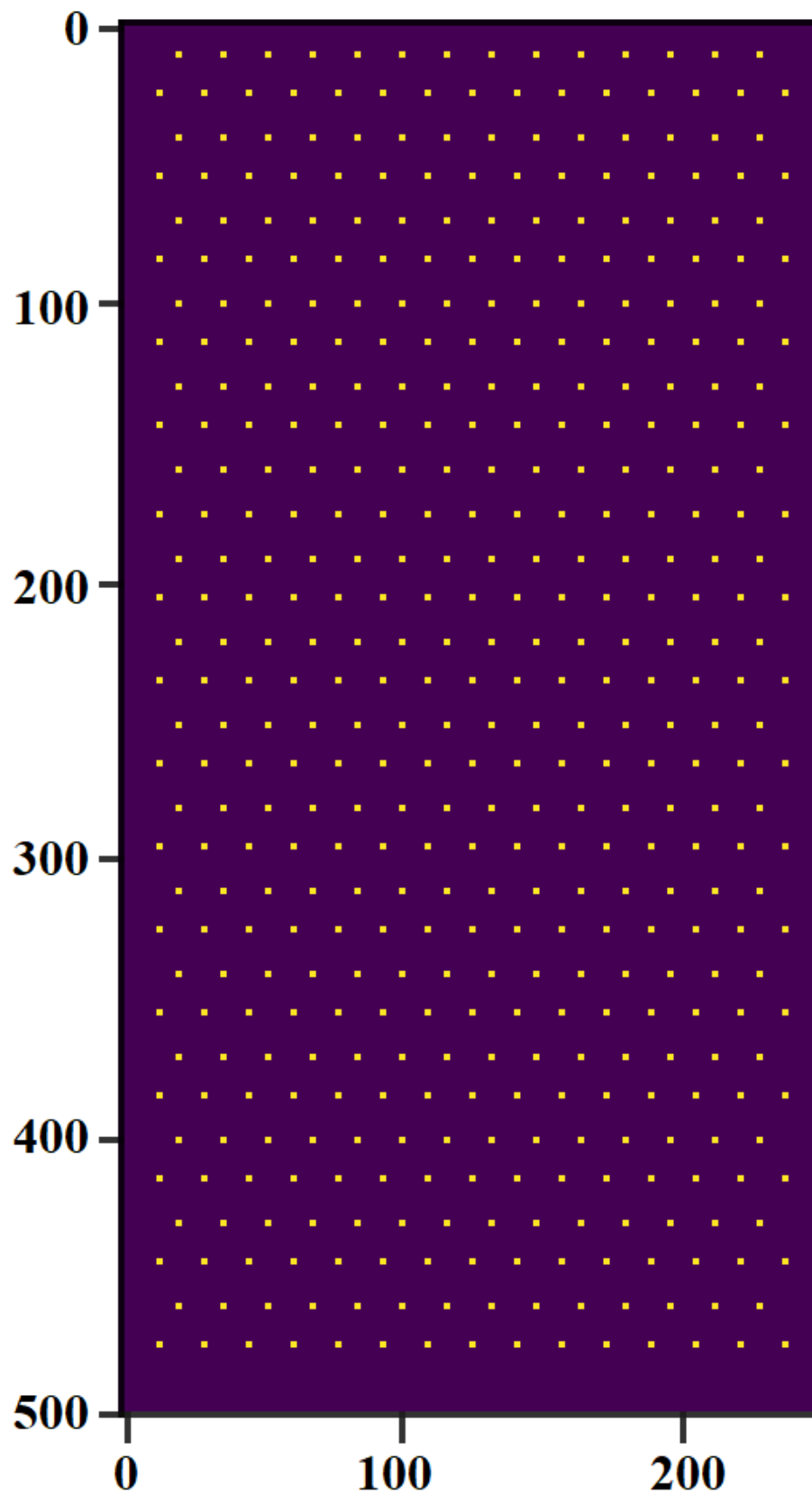


Figura 8: Base dos feixes posicionadas no interior do talhão.
Fonte: Do próprio autor.

As pilhas foram posicionadas nas bordas viáveis do talhão de forma a respeitarem uma distância de segurança entre a quina do talhão e entre as próprias pilhas para prevenção de incêndio.

Mediante as condições propostas para a simulação da área foram dispostos 495 feixes no interior do talhão e 315 pontos para o empilhamento da madeira, sendo que cada ponto pode receber até dois feixes, gerando um total de 630 destinos disponíveis para receber os feixes.

A necessidade de se alocar dois feixes por ponto de empilhamento ocorreu devido à resolução espacial da imagem, o que resultou em uma quantidade inferior de pontos na pilha (*pixels*) comparadas a quantidade de feixes.

Em uma situação real, a quantidade de viagens que um ponto da pilha pode receber tende a variar com a produtividade do talhão, a área disponível para o empilhamento e o volume de carga transportado por viagem do *Skidder*. Para se trabalhar neste tipo de cenário de campo, uma maior resolução espacial é aconselhável.

Ao se quantificar as variáveis descritas acima, uma distribuição mais homogênea da madeira no entorno das bordas viáveis, ou uma localização mais estratégica para o empilhamento podem ser dimensionadas. Vários benefícios podem estar relacionados a esta tomada de decisão, como contribuir para a secagem da madeira no caso de uma distribuição mais homogênea, colaborar com a atividade de traçamento dos fustes e para um carregamento mais rápido do veículo de transporte, além de auxiliar em uma rota menos onerosa para o deslocamento do *Skidder*.

4.2.2 Definição de rota

Com o objetivo de simular o deslocamento da máquina foi proposto neste trabalho uma adaptação do algoritmo do Vizinheiro Mais Próximo. Embora exista outros mais eficientes na resolução do problema, este método foi o escolhido pela facilidade inicial em se implementar as restrições aplicadas.

O processo de definição da rota de deslocamento do *Skidder* foi subdividido em três etapas. A primeira consistiu na criação de um ambiente simulado para ser utilizado no traçamento das rotas. A segunda consistiu em identificar e solucionar problemas de restrições na área simulada para que o algoritmo encontre uma solução viável, sendo estas restrições

resolvidas com base em superfícies de custos definidas para a área. A terceira etapa consistiu em executar o algoritmo do Vizinho Mais Próximo adaptado para encontrar uma rota viável.

4.2.2.1 Visão geral do algoritmo

A adaptação do Algoritmo do Vizinho Mais Próximo baseia-se na busca pelo destino de menor distância com relação à posição atual. A partir de um ponto inicial busca-se seguir para o feixe mais próximo, posteriormente do feixe para a pilha de destino mais próxima e desta, para o feixe mais próximo. Isto é feito sucessivamente até que todos os feixes tenham sido alocados nas pilhas alternativas de destino (Figura 9). As etapas de execução deste algoritmo correspondem a: 1 – escolha o ponto de início da máquina; 2 – encontre o feixe mais próximo e determine o deslocamento; 3 – encontre a pilha mais próxima e determine o caminhamento; 4 – há algum feixe disponível para extração? Se sim, retorne ao passo 2, caso contrário vá para o passo 5; 5 – Fim de execução do algoritmo.

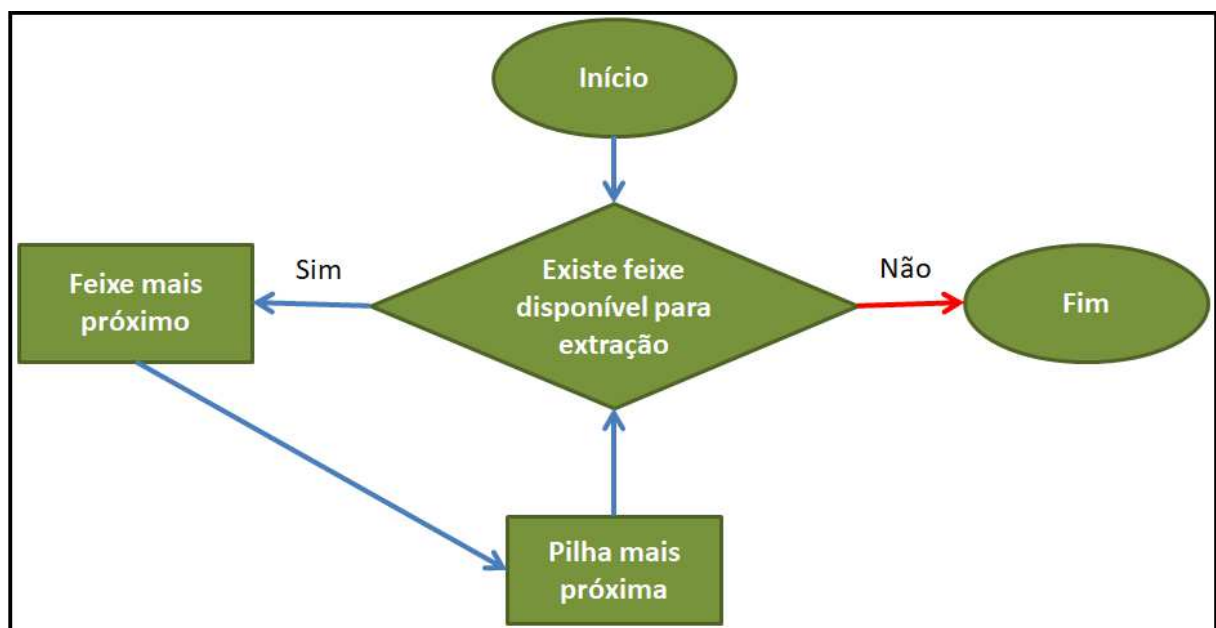


Figura 9. Fluxograma representativo da atividade simulada pela adaptação do Algoritmo do Vizinho Mais Próximo.

Fonte: Do próprio autor.

4.2.2.2 Restrições de deslocamento

Para o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo, caso não seja inserida nenhuma restrição no deslocamento entre dois pontos de coordenadas geográficas, ele calculará a distância euclidiana que nada mais é do que a hipotenusa de um triângulo retângulo definido pelas coordenadas x e y .

Em um ambiente real uma série de restrições podem ser observadas, como a presença de obstáculos, condições climáticas, relevo, condições de risco, Distância Média de Extração (DME), visibilidade, entre outras específicas de cada local.

No ambiente simulado inicialmente não foram considerados obstáculos, como a presença de árvores nativas ou áreas restritas para o deslocamento (bacias de contenção, grandes formigueiros, etc.), já que estas são peculiaridades pontuais em alguns talhões. Para o computo inicial das rotas foram considerados os problemas frequentes na operação em um talhão plano, retangular e com plantio uniforme. Estas considerações interferem nas distâncias entre feixe e pilha. As restrições consideradas foram a de não deslocamento sobre feixes posicionados no interior do talhão e não aceitar manobra de arraste em marcha ré. Para satisfazer estas restrições foi necessário embutir algumas superfícies de custos. Estas superfícies garantem que o algoritmo reconheça locais onde o deslocamento não é possível naquele determinado momento.

Para se evitar o deslocamento sobre os feixes foi atribuído aos *pixels* na coluna “Feixe” um valor de custo superior a qualquer rota que possa ser traçada pelo algoritmo. Desta forma, os *pixels* referentes aos feixes ainda alocados no talhão nunca serão selecionados para uma possível rota. Para esta etapa foi utilizado a matriz binária original de entrada para o feixe, sendo atribuído assim o valor de 10000 e 1 para os feixes que possuíam originalmente os valores de 1 (feixes) e 0 (sem feixes), respectivamente.

Ao proibir que a rota seja orientada para algum caminho que atravessasse feixes no interior do talhão, uma anomalia para a operação de campo começou a ocorrer no deslocamento definido pelo algoritmo. Esta anomalia é a necessidade da máquina realizar manobras em marcha ré para retirar um feixe do interior do talhão, conforme demonstrado na figura 10.

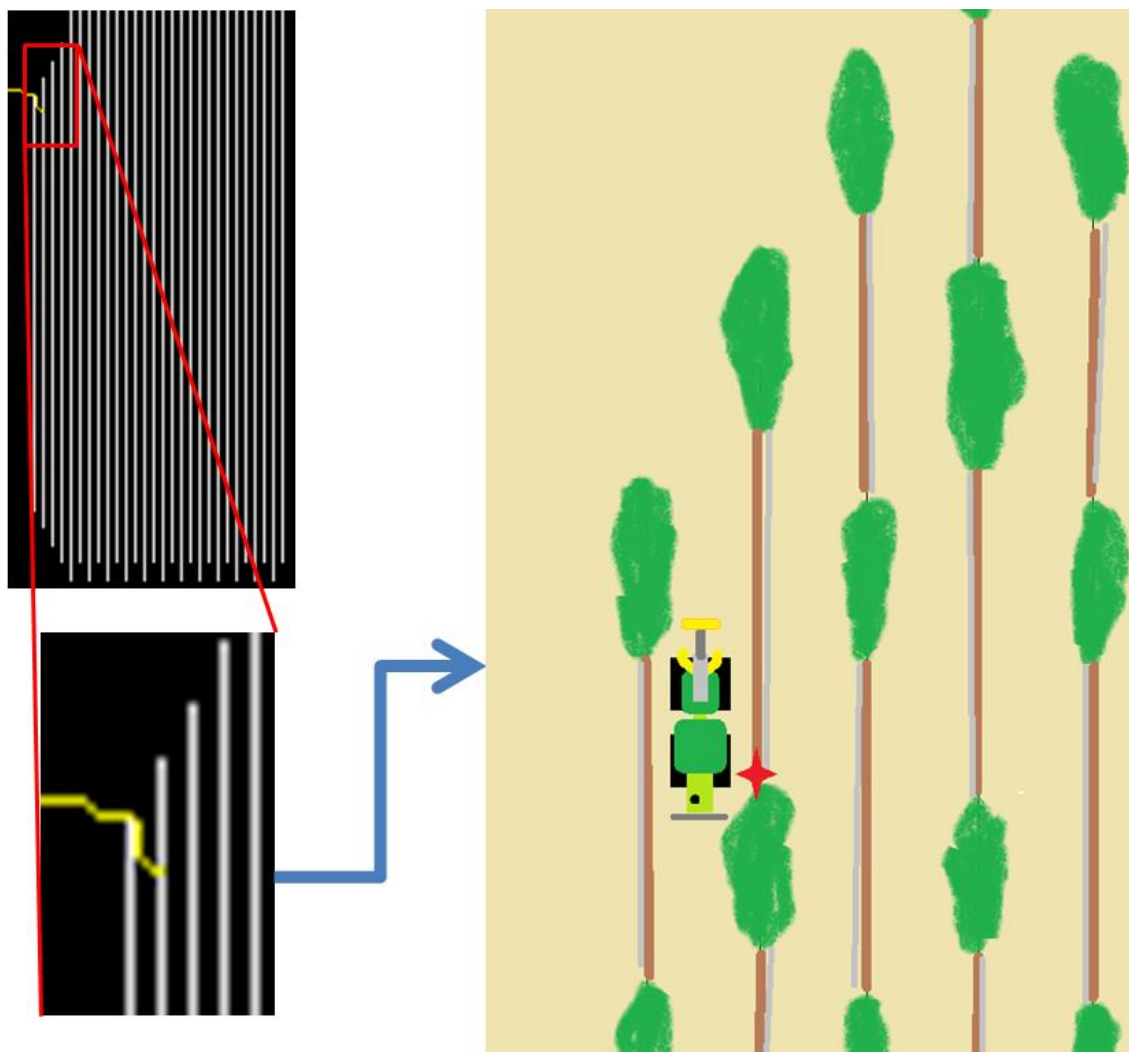


Figura 10. Demonstração de situação em que o *Skidder* necessitará de arrastar o feixe selecionado em marcha ré para poder realizar o transporte sem passar por cima de feixes laterais.

Fonte: Do próprio autor.

Realizar manobras com o *Skidder* carregado em marcha ré é considerado normal em três situações: para sobrepor um feixe a outro, para alinhar as bases dos fustes antes de seu posicionamento na pilha ou para posicionar o feixe corretamente na pilha de destino. Estas manobras normalmente são em distancias curtas e tem a finalidade de alinhar a madeira.

Para solucionar esta anomalia operacional foi criada uma superfície de custo que considerou tanto o peso da distância entre a base do feixe e a pilha, como também a distância da base do feixe com os feixes mais próximos, tornando inviável a busca por feixes que estejam cercados por outros nas duas laterais. O resultado desta superfície de custo está apresentado na figura 11.

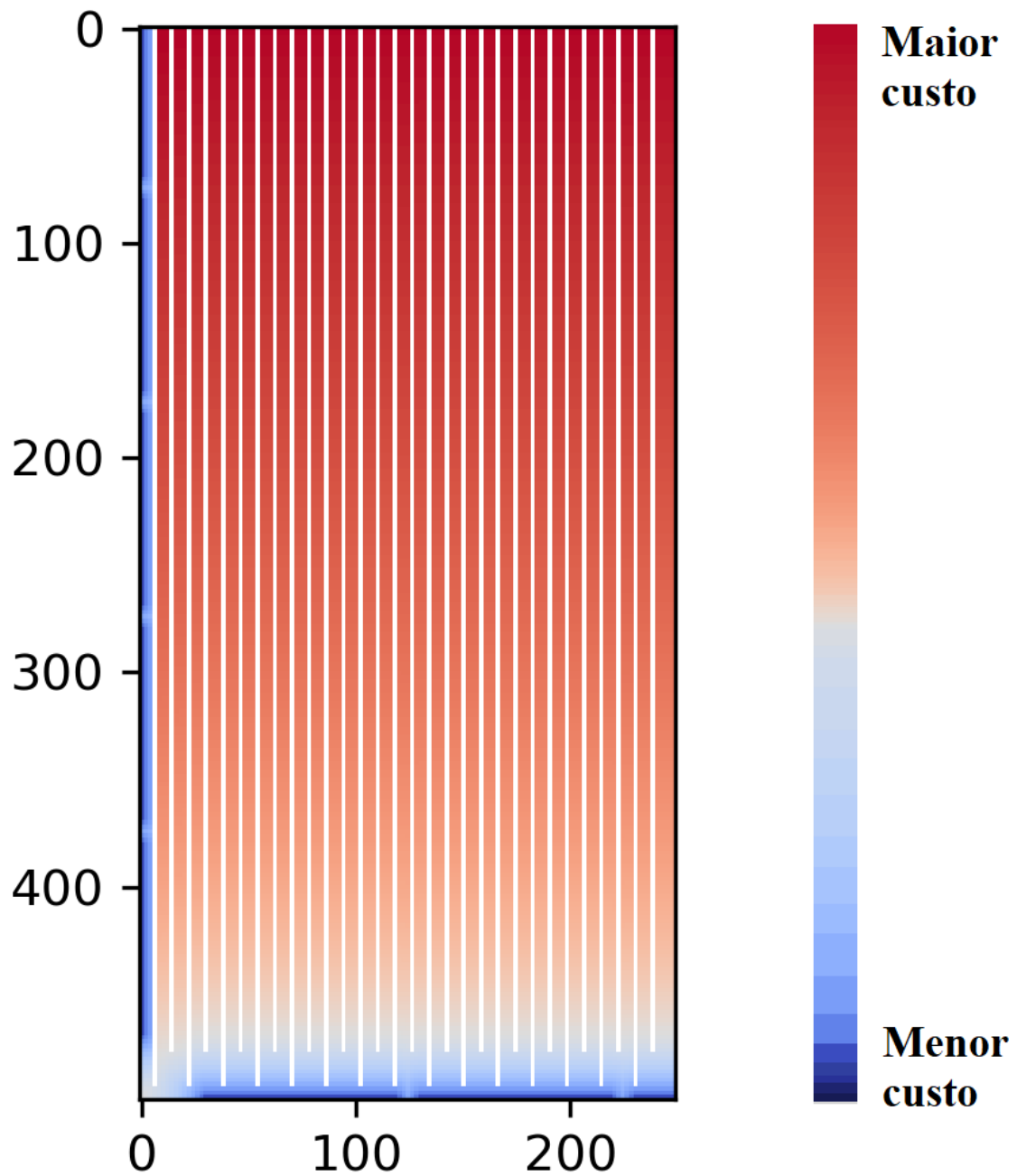


Figura 11. Superfície de custo criada para impedir a escolha de feixes que obriguem o *Skidder* realizar manobra em marcha ré carregado.
 Fonte: Do próprio autor

Este processo é repetido para cada ciclo operacional até que todos os feixes sejam retirados do interior do talhão.

4.2.2.3 Definição da rota viável

A definição da rota foi seguida conforme a sequência apresentada no pseudocódigo do algoritmo Vizinho Mais Próximo adaptado para o problema proposto, apresentado no quadro 1. Os passos 1 a 5 foram abordados anteriormente.

Quadro 1: Pseudocódigo do Algoritmo do Vizinho Mais Próximo adaptado para o problema proposto.

Algoritmo "Vizinho mais próximo para definir rotas de arraste de madeira"

Passo 1: Importar bibliotecas

Passo 2: Inserir Funções para dados de entrada e saída

Passo 3: Inserir as Variáveis

Imagen_feixe

Imagen_pilha

Definir quantas viagens cada pilha tem
capacidade de receber

Passo 4: Gerar superfície de custo para não ocorrer deslocamento sobre feixes e, nem tão pouco, manobra de marcha ré com carga.

Passo 5: Identificar todas as bases de cada feixe no interior do talhão e defini-las como não visitadas.

Passo 6: Definir um feixe como ponto de partida.

Passo 7: Enquanto:

Feixe > 0, faça;

Calcular a menor distancia para a pilha

disponível mais próxima e excluir feixe dos
disponíveis.

Definir caminho de arraste Feixe -> Pilha.

Excluir 1 viagem disponível da pilha.

Se Pilha = 0, tornar pilha indisponível.

Calcular a distância para o feixe mais próximo.

Definir rota de deslocamento vazio para o

feixe.

Se Feixe = 0, Fim.

Para o Passo 6 optou-se por indicar um feixe para o início da resolução do problema proposto, portanto a escolha do primeiro feixe foi supervisionada. Este feixe foi o localizado na posição $x=3$ e $y=246$, sendo o primeiro feixe localizado no canto inferior esquerdo da figura 8. A escolha por esta posição se dá pelo fato de normalmente o operador ter a tendência de iniciar sua atividade pelo feixe localizado nas esquinas dos talhões.

O resultado de distância total percorrida calculada pelo algoritmo foi comparado com a distância obtido por outros pontos de partida na mesma área simulada. Esta comparação permitirá inferir se o ponto de partida influencia ou não na DME.

Com as bibliotecas importadas, as variáveis inseridas, as funções e restrições criadas foi possível rodar o *loop* (repetição) dos ciclos operacionais do algoritmo, que são as iterações Feixe – Pilha e Pilha – Feixe.

4.2.3 Processamento dos dados

Foram utilizados os seguintes *softwares*:

- QGIS 2.18.20: o QGIS é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de Código Aberto, sendo um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo). Este *software* foi utilizado para gerar as imagens no formato .tif, as quais foram utilizadas como simulação da área.
- Anaconda (Python 2.7): ferramenta computacional gratuita que permite gerir distribuições de *Python*.
- Spyder 3.3.6: é um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) utilizado para escrever na linguagem *Python*. No trabalho em questão foi utilizado para escrever e rodar o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo.

Para o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo foram utilizados as seguintes bibliotecas para a linguagem de programação *Python*:

- NumPy: é uma biblioteca de processamento matemático que suporta arranjos, vetores e matrizes multidimensionais.
- OS: cria uma interface com o sistema operacional utilizado no computador.
- PIL: biblioteca de imagens com função de manipulação a partir de um *script Python*.
- Matplotlib: biblioteca para visualização de dados em duas dimensões (gráficos) e, com possibilidade de edição dos mesmos.
- Skimage.graph: pacote utilizado para o cálculo dos custos no traçado do deslocamento.
- Scipy.ndimage: pacote para processamento e análise de imagens projetadas para operar com matrizes multidimensionais.
- Scipy.spatial: biblioteca para estrutura de dados e algoritmos para dados espaciais. Foi utilizado para o Algoritmo do Vizinho mais Próximo.
- Skfmm: biblioteca utilizada para cálculo de tabelas de tempo de viagens. Deve ser instalada manualmente.

4.3 Deslocamento em campo

A operação com o *Skidder* é uma atividade dinâmica em que o planejamento deve procurar minimizar a DME. Este é um planejamento complexo para ser realizada pelo

operador. Com o objetivo de visualizar rota simulada e a atividade real de campo, planejada pelo operador, foram posicionados aparelhos GPS da marca Garmin e modelo eTrex 10 configurados para coletar uma coordenada do caminhamento a cada 3 segundos.

A área disponibilizada para coleta dos dados de caminhamento da máquina compreende um talhão de *Eucaliptus sp.* localizado na região geográfica de Teófilo Otoni em Minas Gerais. A atividade foi executada por dois *Skidders* da marca John Deere, modelo 948L.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira etapa, constituída da criação do ambiente virtual, se mostrou de fácil aplicação para o problema proposto. Para se simular o ambiente nas condições especificadas, o pré-requisito é o conhecimento em nível básico de programas de SIG. No projeto foi utilizado o QGIS, porém sua elaboração pode ser possível em outros programas computacionais com a mesma finalidade.

Ressalta-se que esta facilidade na elaboração ocorre devido às especificações propostas para a área simulada de estudo. Um terreno plano, retangular, com os feixes dispostos sistematicamente e com distribuição homogênea. Esta seria uma área perfeita de se encontrar em campo, porém, para a maioria dos talhões não é a real.

Para possibilitar o trabalho com dados reais sem a necessidade de simular o ambiente de campo, algumas tecnologias podem ser utilizadas como o uso de *drones* para coleta de imagens do talhão, elaboração do ortomosaico e identificação dos feixes por meio de reconhecimento de padrões. Uma desvantagem desta técnica está na possibilidade de não identificação de alguns feixes no interior do talhão ou, o contrário, identificar feixes inexistentes. Outra desvantagem corresponde ao custo operacional de se realizar voos em todos os talhões colhidos e o investimento inicial em *softwares* e *hardwares* com capacidade técnica para processamento destas imagens. A possibilidade de desenvolvimento de sensores de distância e de posicionamento global para serem acoplados as máquinas que realizam a colheita é outra alternativa para se coletar os pontos das bases dos feixes em campo.

A escolha pela área simulada para o início do desenvolvimento do *scrip* baseado no algoritmo VMP se deu devido a facilidade inicial em se definir as bases dos feixes e conhecer algumas restrições a serem implementadas no algoritmo. Este processo de simulação se mostrou viável para solucionar o problema proposto na pesquisa em questão. No entanto, pode ser necessário um ajuste de metodologia se o objetivo for simular uma área desuniforme. Caso o objetivo for simular volume dos feixes ou número de árvores esta metodologia é válida, sendo necessária apenas a inclusão dos atributos desejados aos feixes que poderá ocorrer de forma aleatória ou supervisionada.

Os resultados dos trajetos traçados para a área simulada podem ser visualizados nas figuras 12, 13 e 14, que representam os custos por intermédio de pesos diferentes atribuídos aos *pixels* durante o processamento, a sequência de feixes extraídos e, por fim, as rotas a serem percorridas respectivamente.

As características próprias da operação com o *Skidder* e seus procedimentos operacionais tornam esta atividade muito dinâmica no campo. A cada deslocamento o operador tem de realizar tomadas de decisão, principalmente quando a operação resultará na coleta de dois ou mais feixes no interior do talhão para serem transportados para a borda. Esta forma de se realizar a operação leva cada operador a desenvolver uma técnica específica e própria. Isso gera uma desuniformidade nas operações com relação ao trajeto que cada um realizará, se mais de um operador pudesse passar pela mesma área realizando a mesma operação.

Considerando o cenário acima descrito é necessário que o *script* desenvolvido baseado no algoritmo VMP também seja dinâmico, alterando as opções de deslocamento para cada feixe transportado, considerando todas as restrições anteriormente impostas. Desta forma, nota-se na Figura 12 que a matriz de custos é reajustada e recalculada ao final de cada etapa da interação que realiza o transporte do feixe para a pilha. Cada vez que um nó feixe é retirado, o peso para o deslocamento aos feixes próximos é alterado, normalmente os tornando mais viáveis, exceto quando os nós “pilhas” mais próximos estão todos ocupados, conforme pode ser notado na interação 495. Com base na metodologia adotada neste trabalho, para cada duas viagens recebidas o nó pilha deixa de estar disponível e, portanto, perde a atratividade. Assim sendo, é atribuído a ele um peso inviável para que seja um destino.

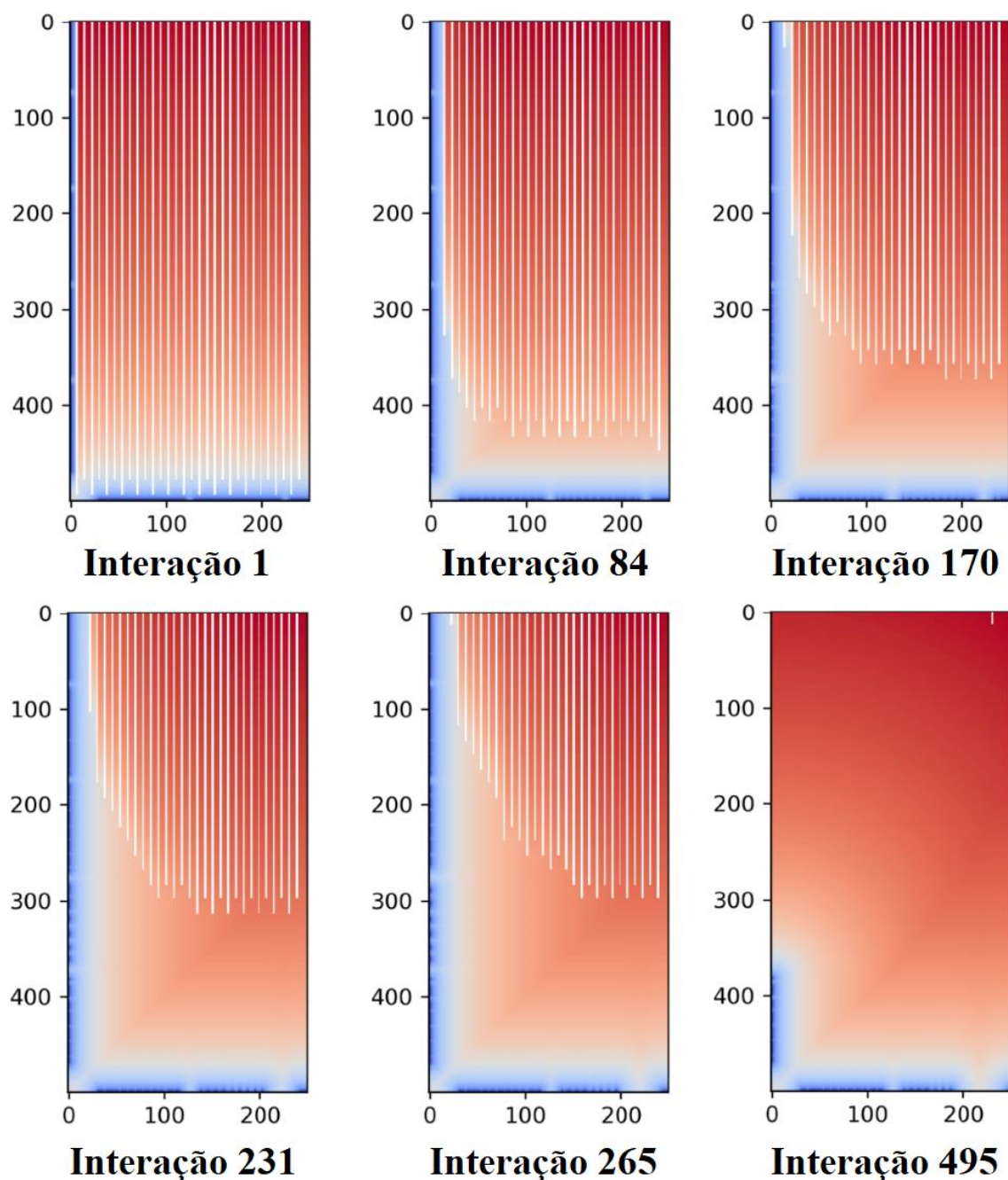


Figura 12. Superfície de custo atualizada para cada interação Feixe – Pilha.
Fonte: Do próprio autor.

Caso seja de interesse, outras restrições podem ser inseridas e quantidades de viagens recebidas no mesmo ponto podem ser reduzidas, ou aumentadas. Em povoamentos cuja produtividade seja baixa e a capacidade de carga da máquina utilizada seja alta, poderá ser destinado apenas uma viagem para cada ponto, distribuindo a madeira por todo o talhão em pilhas mais baixas que facilitam a secagem dos fustes. Para este mesmo cenário com madeiras mais secas, pode-se destinar mais viagem para pontos específicos de forma a garantir acúmulo de feixes em pontos específicos a fim de melhorar as operações subsequentes, como o

traçamento e transporte. Um exemplo para esta finalidade pode ser o acúmulo de madeira nas bordas com maior facilidade para escoamento desta madeira.

Estas tomadas de decisões devem ser inseridas em forma de custos atribuídos a cada restrição criada. A restrição criada na figura 12 tem o objetivo de evitar as manobras carregadas em marcha ré, para isso foi considerado um peso maior na tomada de decisão para os feixes que se encontram cercados por outros nas duas laterais e a frente. Este procedimento garante a viabilidade de transporte apenas dos feixes com no mínimo uma lateral e a frente livre.

Com as restrições bem definidas e as matrizes de custos incorporadas ao *script*, a rota a ser percorrida durante os deslocamentos vazios e carregados podem ser definidas para o *Skidder*. Alguns exemplos de rotas geradas ligando um nó Feixe a um nó Pilha, ou nó Pilha a um nó Feixe, estão representados na figura 13. Nota-se que a eliminação do feixe a ser transportado ocorre tão logo é traçado o trajeto a ser percorrido no sentido Feixe – Pilha, como representado nas interações 1, 170 e 495. Este é um passo importante a ser considerado, pois caso o algoritmo não considere esta retirada, ou a faça em um passo inapropriado, a execução do *script* poderá entrar em um *loop* infinito.

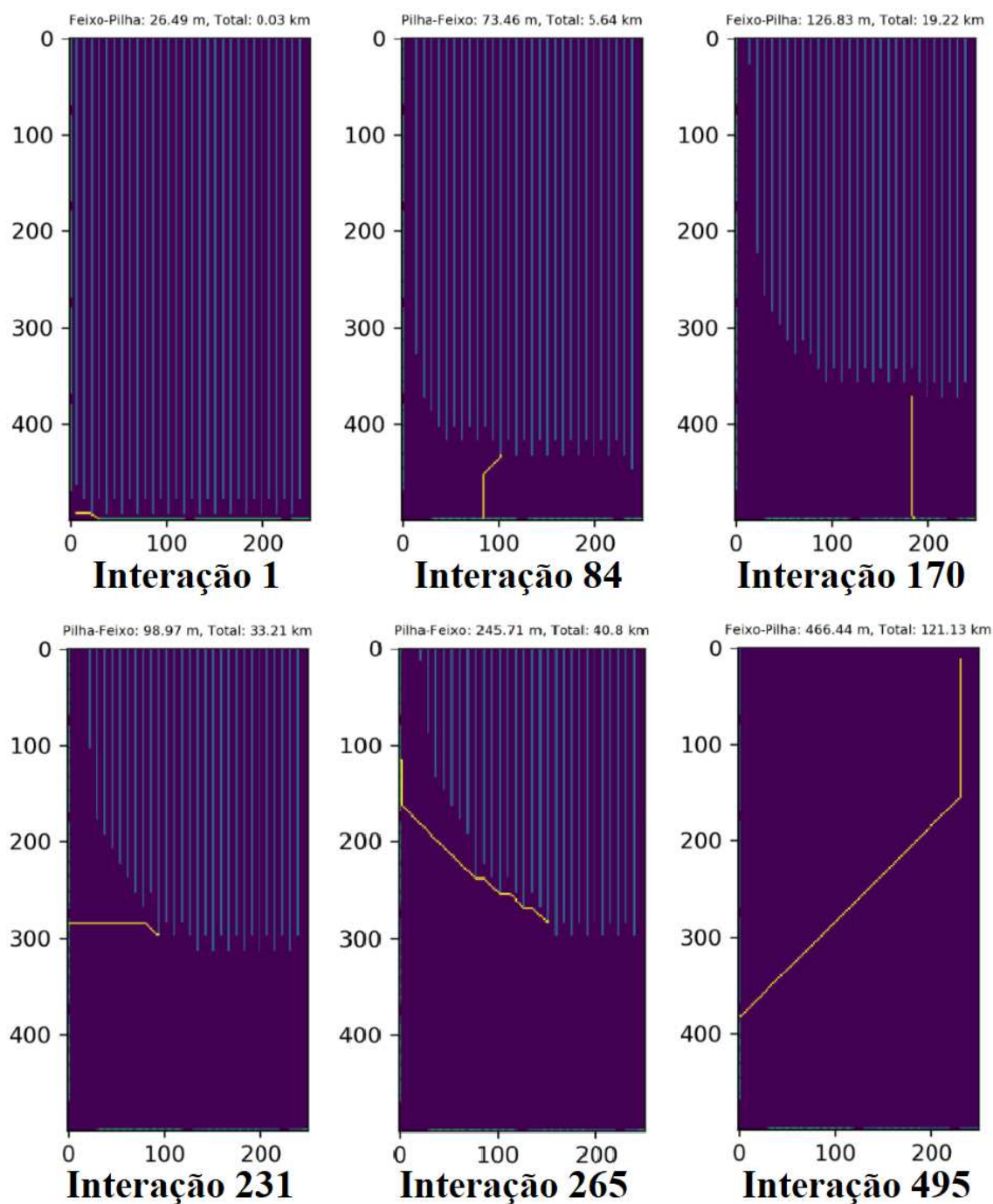


Figura 13. Roteamento simulado para a máquina com base no algoritmo Vizinho Mais Próximo para cada interação Feixe – Pilha e Pilha – Feixe.

Fonte: Do próprio autor.

Embora a otimização da rota para o *Skidder* por meio do Vizinho Mais Próximo tenha encontrado uma solução viável, melhorias necessitam ser implementadas no *script* para corrigir o problema de buscas por nós muito distantes, como o apresentado na interação 265. Este problema se concentra no trajeto Pilha – Feixe e está ligado ao peso dado aos feixes mais próximos na matriz de custos, inserida para se evitar o deslocamento carregado em marcha ré.

Desta maneira há a necessidade em se melhorar esta matriz de custo de forma a permitir que o algoritmo identifique o seu vizinho mais próximo com base na distância real, porém mantendo a restrição imposta. Este fato ocorreu devido a matriz de custo formulada considerar o peso da base do feixe em função de todos os pontos de pilha disponível. Uma possível solução para este problema é programar esta matriz de custo de forma a se calcular os pesos a partir do ponto de origem, no caso o nó em que se iniciará o deslocamento. Esta solução também tende a ser dinâmica, tendo em vista que a cada viagem ela deve ser recalculada considerando a localização atual da máquina e inserir as restrições os pesos a partir deste ponto.

Outra observação a ser destacada na solução retornada pelo algoritmo é que por se tratar do Vizinho Mais Próximo, ele mantém uma estratégia míope, isto é, sempre de olho na melhor opção atual, o que pode comprometer a solução global. Desta forma, feixes podem ser “esquecidos” em locais da borda, sendo necessário retornar a ele em um momento de maior custo ou, então, fazer com que a máquina percorra longas distâncias por não ter considerado todas as opções de rota de forma a minimizar o deslocamento total, como pode ser observado na interação 495 da figura 13, em que o trajeto Feixe-Pinha percorreu a distância de 466,44 metros. O caminho mais próximo para este ponto, quando considerado todas as pilhas possíveis seria inferior a 250 metros, por isso é interessante desenvolver algum método que permita a otimização baseando-se em reduzir o deslocamento a partir dos feixes com maiores distâncias.

O grafo completo do trajeto traçado pode ser visualizado na figura 14. Este grafo é devolvido pelo *script* em formato *shapefile*, portanto suas informações podem ser trabalhadas em *softwares* SIG para futuramente serem incorporadas a dispositivos eletrônicos presentes na máquina, com o objetivo de orientar o deslocamento do operador. Este é um passo desejável para homogeneizar os procedimentos operacionais adotados pela empresa, retirar do operador a obrigatoriedade de planejamento da rota, permitindo com que ele tenha mais foco na execução da atividade.

Outro fator que denota a importância em se definir o posicionamento dos feixes, bem como seu destino na pilha e o caminho a ser percorrido foi constatado por Rocha *et al.* (2009), ao qual relataram que o deslocamento noturno sem carga e com carga sofre um aumento de tempo de 24,7% e 28,3% respectivamente. A justificativa dada pelos autores foi que a máquina perdeu mais tempo para identificar os feixes durante a noite.

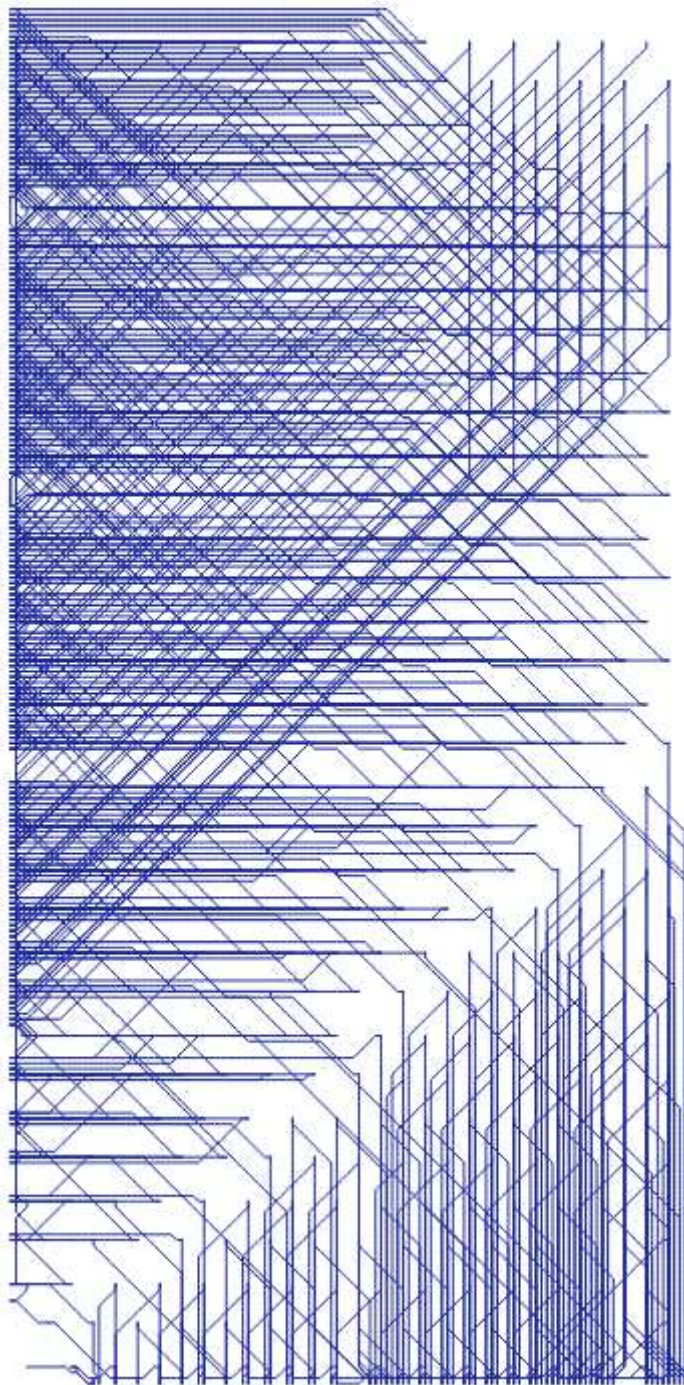


Figura 14. Grafo com todas as rotas definidas pela solução do algoritmo Vizinho Mais Próximo.

Fonte: Próprio autor.

Pode ser observado nesta figura um comportamento diferente a tendência de deslocamento do operador em campo apresentado na figura 15, que representa o deslocamento em uma área parecida com a simulada e coletada através da instalação de um aparelho GPS, durante a operação com o *Skidder*. Percebe-se que ocorreu uma divisão na área, que tende a ser simétrica quando extrapolada para toda a área. Este comportamento é

normalmente desejado para a execução desta atividade ligada a colheita florestal. Outro fator que pode ser observado na figura 14 é a distribuição dos feixes ao longo da pilha, notando-se que houve maior acumulo de madeira nas regiões mais distantes à quina do talhão e que, a distribuição não foi tão homogênea como desejado neste trabalho. Isto pode ser revertido com a implementação de uma restrição que determine a distribuição homogênea da madeira, com a alocação de nós Pilha com número igual aos nós Feixes, ou com a diminuição das áreas de destinos dos feixes, redimensionando os pontos de destino.

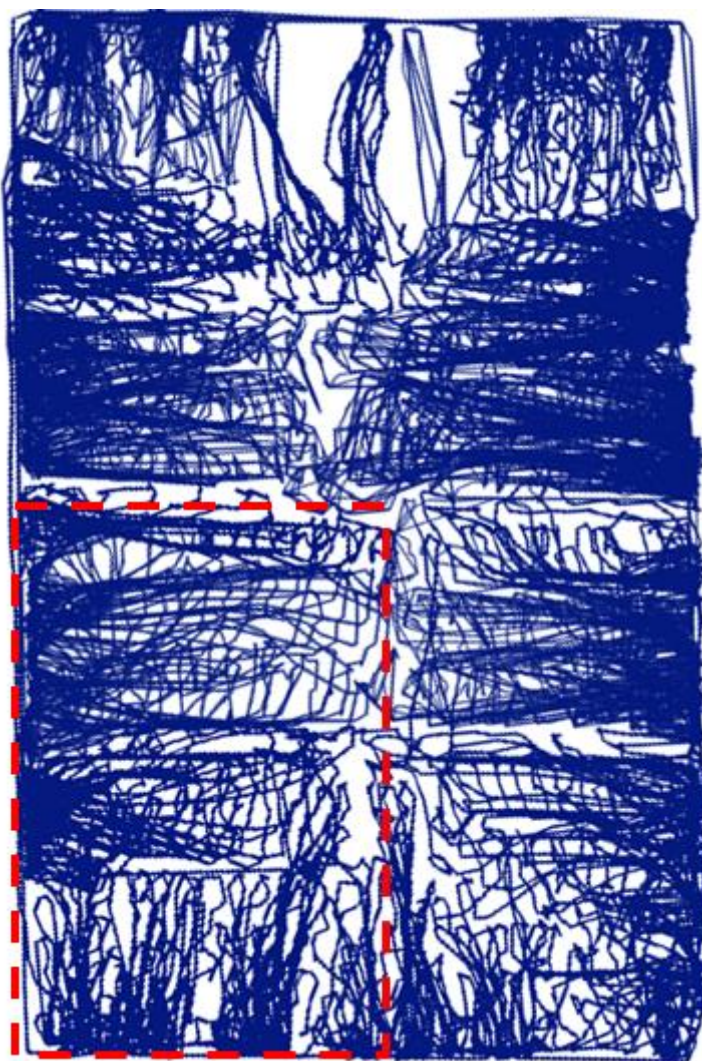


Figura 15. Deslocamento do *Skidder* em um talhão retangular de povoamento de eucalipto em espaçamento de plantio 6 x 1,5, com delimitação em vermelho de área semelhante a simulada na figura 14.

Fonte: Próprio autor.

Ressalta-se que este trabalho considerou um talhão retangular e com um plantio bem homogêneo. Se considerado um talhão irregular, uma solução para o ajuste e

implementação de um *script* que atenda às necessidades específicas é buscar o particionamento da área de forma a subdividi-la em extratos.

O ponto de início da atividade de extração mostrou-se não ser um fator que interfere na distância total percorrida. Nota-se no quadro 2 que a diferença entre se iniciar a atividade pela quina, pelo meio ou pelo final das bordas não representa diferença expressiva na distância a ser percorrida. Portanto para o algoritmo do Vizinho Mais Próximo a escolha de qual feixe será transportado primeiro não interfere na operação, desde que obedecido os pré-requisitos estipulados anteriormente.

Quadro 2: Distância percorrida de feixes pré-determinados e tempo médio para resolução do algoritmo baseado na média de três processamentos.

Feixe		Distância Percorrida (Km)	Tempo (HH:MM:SS)
x	y		
3	246	121,128	01:44:03
59	246	120,605	01:47:59
119	238	121,094	01:42:59
3	118	120,210	01:44:41
3	6	120,154	01:33:18

Para as condições da área simulada o Vizinho Mais Próximo adaptado encontrou uma solução viável de deslocamento, porém este algoritmo ainda requer melhorias. Marcatti (2013) ao utilizar o algoritmo *cutting-plane* e comparar os resultados com o Vizinho Mais Próximo para o deslocamento entre parcelas de inventário florestal chegou à conclusão de que, em média o Vizinho Mais Próximo realizou um deslocamento 16,56% mais longo que a solução exata. Isto considerando o trajeto entre 20 e 80 parcelas, sendo que ao se considerar a solução para 40 parcelas foi encontrada a maior diferença entre deslocamento (21,55%). Desta forma, o autor demonstrou que outras heurísticas podem ser aplicadas com sucesso para resolver este problema de transporte. Ressalta-se que o trabalho de Marcatti (2013) era um problema do caixeiro viajante, que normalmente é mais complexo que um problema de roteamento como o proposto neste trabalho.

Embora este estudo tenha se encerrado nestas três etapas sugere-se como próximos passos a serem realizados, a otimização da rota traçada para o *Skidder*, por um algoritmo mais robusto. Isso se justifica por que o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo pode ser considerado um algoritmo guloso, ou seja, toma a decisão com base na informação disponível no momento e, não analisa o problema como um todo (ROCHA; DORINI, 2004).

6 CONCLUSÕES

O *software* QGIS permitiu a elaboração de um ambiente simulado com as características desejáveis para a utilização no *script* elaborado, com base no algoritmo Vizinho Mais Próximo.

A otimização por meio do algoritmo do Vizinho Mais Próximo resolveu o problema proposto, encontrando uma alternativa viável para a sequência de extração dos feixes de madeira com o *Skidder*.

Há a necessidade de melhorias no *script* e, ou substituição do algoritmo para se encontrar soluções viáveis para outras situações e/ou condições de terreno.

7 RECOMENDAÇÕES

Para futuros trabalhos sobre este tema/assunto recomenda-se o uso de heurísticas mais robustas como Busca Tabu, Algoritmos Genéticos ou *Simulated Annealing*, além de se incluir outras restrições ao deslocamento do *Skidder*, como a superfície do terreno, obstáculos e raio de giro da máquina.

A simulação de talhões com geometrias não regulares também pode ser uma abordagem interessante, tendo vista que muitas empresas possuem áreas com estas características. Uma das alternativas para se solucionar problemas com esta característica seria particionar a área e rodar o algoritmo para cada seção. Também é interessante a incorporação de mais de um operador trabalhando no mesmo talhão, atentando para a distância de segurança, condição esta também vivenciada em campo nas empresas florestais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. D.; LANA, J. A. S.; RIBEIRO, R. N. Floresta 4.0 – Integrando as operações de colheita florestal com SAP ECC. **Impact Awards 2019**. São Paulo, 2019. Disponível em: < <https://www.cenibra.com.br/wp-content/uploads/2019/04/Floresta-4.0-Integrando-as-operacoes-de-colhieita-florestal-com-SAP-ECC.pdf>>. Acesso em: 10 de maio de 2019

AKAY, A. E.; ERDA, O.; SESSIONS, J. Determining productivity of mechanized harvesting machines. **Journal of Applied Sciences**, v. 4, n.1, p. 100-105, 2004.

AYRES, M.; SALES, H. Internet das Coisas e Mobile Marketing: limites e possibilidades. **Publicidade Digital: formatos e tendências da nova fronteira publicitária**, Bahia, n.1, 2010. Disponível em: < <https://pt.slideshare.net/ayres86/internet-das-coisas-e-mobile-marketing-limites-e-possibilidades>>. Acesso em: 10 de maio de 2019

BALLE, F. **Motormanuelle starkholzernte am steilen hang mit traktionswindenunterstütztem forstspezialschlepper**. 2012 Dissertação (mestrado), Albert Ludwigs Universität, Freiburg im Breisgau, Freiburg, Alemanha, 2012.

BECKEL, C.; KLEIMINGER, W.; STAAKE, T.; SANTINI, S. Improving Device-level Electricity Consumption Breakdowns in Private Households Using ON/OFF Events. **Anais... 3rd Workshop on Networks of Cooperating Objects (CONET) in conjunction with CPS Week**, Beijing, China, abril 2012.

BERTOLA, A. **Eucalipto - 100 anos de Brasil- "Falem mal, mas continuem falando de mim!"**. Setor de Inventário Florestal - V&M Florestal Ltda, Curvelo - MG, 91p., 2013. Disponível em: <http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/Eucalipto_100%20anos%20de%20Brasil_Alexandre_Bertola.pdf>. Acessado em: 12 de abril de 2019.

BREPOHL, D. **Contribuição do Setor Florestal à Economia Brasileira**. **Revista Floresta**, Curitiba – PR, v. 11, n.1, p. 53 – 57, 1980.

BUOGIORNO, J; GILLESS, J. K. **Decision methods for forest resource management**. Amsterdam: Academic Press, 2003. 439p.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5 ed. Viçosa: UFV, 2017. 636 p.

CARMO, F. C. A.; FIELDLER, N. C.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P. Otimização do uso do trator florestal *forwarder* em função da produtividade, custos e capacidade de carga. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.39, n.3, p.561-566, 2015

COSTA, S. **Sobre-representação e interesses regionais: o caso da Lei de Informática**. 2007. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Política) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

DANTAS, M. B.; ANDREOLI, C. V. **Código Florestal Anotado: Observações de ordem técnica e judicial**. Editora Lumen Juris, 2017.

D'AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M.; WEINTRAUB, A. Using operational research for supply chain planning in the forest products industry. **INFOR**, v. 46, n. 4, p. 265-281, 2008.

DOURISH, Paul. Re-space-ing place: „place“ and „space“ ten years on. In: Computer Supported Cooperative Work 2006, Banff. **Anais...** Banff, Alberta: CSCW, novembro 2006, pp. 229-308. Disponível em <<http://www.ics.uci.edu/~jpd/publications/2006/cscw2006-space.pdf>>, 2006. Acesso em 28/02/2015.

FERNANDES, H.C.; LOPES, S. E.; TEIXEIRA, M. M., MINETTE, L. J.; RINALDI, P. C. N. BERNARDES, A. M. Avaliação das características técnica e econômica de um sistema de colheita florestal de árvores inteiras. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v.37, n. 83, p. 225-232, set., 2009.

FERREIRA, L. S. **Estudo de tempos e movimentos na operação de adubação de plantio na empresa Eucatex S.A., Botucatu, São Paulo**. 2011. 28 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

FIEDLER, N. C.; ROCHA, E. B. DA; LOPES, E. DA S. Análise da produtividade de um sistema de colheita de árvores inteiras no norte do estado de Goiás. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 38, n. 4, p. 577-586, out./dez. 2008.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. Planificación de carreteras forestales y sistemas de aprovechamiento. **Estudios FAO**: Montes nº 2, FAO, Roma, 1978, 181p.

FREITAS, L. C.; MACHADO, C. C.; SILVA, G. C. A mecanização da colheita florestal no Brasil. **Revista da Madeira**, v. 20, p. 46-50, 2009.

FRISK, M.; GÖTHE-LUNDGREN, M.; JÖRNSTEN, K.; RÖNNQVIST, M. Cost allocation in collaborative forest transportation. **European Journal of operational Research**, v. 205, n. 2, p. 448-458, 2010.

GONÇALVES, S. B. **Modelagem matemática da produtividade do corte florestal mecanizado**. 2017. 62 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2017.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; LACLAU, J. P.; BOUILLET, J. P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests**, Grahamstown, v. 70, n. 2, p. 105-118, Aug. 2008

GUINARD, D. **A Web of Things Application Architecture - Integrating the RealWorld into the Web**. 2011. 245f. Tese (Doutorado em Computer Science) - University of Fribourg, ETH Zurich, 2011.

HILLER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8 ed. São Paulo: McGraw-hill, 2010. 828p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Sumário Executivo 2018, ano base 2017.**- IBÁ. 2017. 80 p. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/digital-sumarioexecutivo-2018.pdf>>. Acesso em 11 de março de 2019.

INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C.; **Agricultura de Precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília-DF, Embrapa, 2014, 596 p.

JENA, S. D.; CORDEAU, J. F.; GENDRON, B. Modeling and solving a logging camp location problem. **Annals of Operations Research**, v. 232, n. 1, p. 151-177, 2015.

KRAMER, R. H. F. R.; SUBRAMANIAN, A.; PENNA, P. H. V. Asymmetric vehicle routing problem with heterogeneous limited fleet: a case study in a beverage industry. **Gestão & Produção**, v. 23, n. 1, p. 165-176, 2016.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões**. 4ª ed. São Paulo: Pearson Prentice hall, 2009

LEÃO, R. M. **A floresta e o homem**. São Paulo: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2000. 448 p.

LIMA, J. S. S.; LEITE, A. M. P. Mecanização. In: MACHADO, C.C. **Colheita florestal**. 3 ed. Viçosa. UFV, 2014. p.46-73.

LOPES, E. S.; MISSEL, J. W. P.; DIAS, A. N.; FIEDLER, N. C. Avaliação técnica do trator florestal arrastador "*Skidder*" com diferentes tipos de rodados na extração de madeira em povoamentos de pinus. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.31, n.6, p. 1053-1061, 2007.

LOPES, E. S.; FERNANDES, H. C.; MINETTE, L. J.; SILVEIRA, J. C. M.; RINALDI, P. C. N. Avaliação técnica e econômica de um skidder operando em diferentes produtividades e distâncias de extração. **Ciênc.agrotec.**, Lavras, v.33, n.6, p.1621-1626, nov./dez., 2009.

LOPES, E. S.; DINIZ C. C. C. Produtividade do trator florestal *Chocker Skidder* na extração de madeira em terrenos declivosos. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 3, p. 625 – 634, 2015.

MACHADO, C. C.; SILVA, E. N.; PEREIRA, R.S. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: MACHADO, C.C. (Ed.). **Colheita florestal**. 3. Ed. Viçosa, MG: UFV, 2014. p.15-45.

MACHADO, C.C. (Ed.). **Colheita florestal**. 3. Ed. Viçosa, MG: UFV, 2014. 543p.

MACHADO, C.C.; LOPES, E. S. Planejamento. In: MACHADO, C.C. (Ed.). **Colheita florestal**. 3. Ed. Viçosa, MG: UFV, 2014. p.206-252.

MACHADO, C.C.; LOPES, E. S. Análise da influência do comprimento de toras de eucalipto na produtividade e custo da colheita e transporte florestal. **CERNE**, Lavras, v. 6, n. 2, p.124-129, 2000.

MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO, C. M. S.; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A.; CASTRO, G. P. Sistemas. In: MACHADO, C.C. (Ed.). **Colheita florestal**. 3. Ed. Viçosa, MG: UFV, 2014. p.179-205.

MALINOVSKI, R. A.; FENNER, P. T.; SCHACKKIRCHNER, H.; MALINOVSKI, J. R.; MALINOVSKI, R. A. Otimização da distância de extração de madeira com *forwarder*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 171-179, 2008.

MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R. **Evolução dos sistemas de colheita de pinus na região Sul do Brasil**. Curitiba: FUPEF, 1998. 108p.

MARCATTI, G. E. **Caminhamento ótimo para acesso às parcelas de inventário florestal**. 2013. 41f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Viçosa, 2013.

MARTINI, A. J. **A cultura do eucalipto no Brasil completa 100 anos**. Rio Claro, SP, 2010. Disponível em: < <https://tudosobreplantas.wordpress.com/2010/10/25/a-introducao-do-eucalipto-no-brasil-completa-100-anos/>>. Acesso em 12/04/2019

MENDONÇA, J. S. Collor tinha razão; o corra brasileiro era uma carroça, **Folha de São Paulo**, 29 de agosto de 2010. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/fsp/veiculos/cv2908201002.htm>>. Acesso em: 20 de abril de 2019.

MIYAJIMA, R. H.; TONIN, R. P.; PEREIRA, G.; FENNER, P. T. Análise do rendimento e dos custos do Skidder em diferentes distâncias de extração. **Anais... 5ª Jornada Científica e Tecnológica da FATEC de Botucatu**. Botucatu-SP, 2016.

NASCIMENTO, A. C.; LEITE, A. M. P.; SOARES, T. S.; FREITAS, L. C. Avaliação técnica e econômica da colheita florestal com *feller buncher*. **Revista Cerne**. Lavras, MG. v. 17 n. 1, janeiro-fevereiro, p 9-15, 2011.

PARISE, D. J. **Influência dos requisitos pessoais especiais no desempenho de operadores de máquinas de colheita florestal de alta performance**. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

PAULA, E. N. D. S. O. D. **Avaliação técnica, de custos e ambiental de dois modelos de harvester na colheita florestal**. 2011. 82 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

PINTO, K. C. R. **Aprendendo a decidir com a pesquisa operacional: modelos e métodos de apoio à decisão**. Uberlândia: EDUFU, 2005. 114 p.

PIZZOLATO, N. D.; GANDOLPHO, A. A. **Técnicas de otimização**. Rio de Janeiro, RJ: LTC ed., 2009. 225 p.

RABENSCHLANG, D. R. Pesquisa Operacional. **Apostila**. Universidade Federal de Santa Maria. 2005, 71 p.

ROCHA, A.; DORINI, L. B. **Algoritmos gulosos: definições e aplicações**. Campinas, SP, 2004. Disponível em:

<<http://www.ic.unicamp.br/~rocha/msc/complex/algoritmosGulososFinal.pdf>>. Acesso em: 02 de julho de 2019.

RODRIGUES, C. K.; LOPES, E. S.; OLIVEIRA, D.; SAMPIETRO, J. A. Influência do volume das árvores no desempenho do processador florestal *harvester* em povoamento de eucalipto. **BIOFIX Scientific Journal**. v. 3 n. 2 p. 237-242. 2018.

RODRIGUES, C. K. **Colheita e Transporte Florestal**. 1 Ed. Curitiba, PR. 2018, 68 p.

RÖNNQVIST, M. ; D'AMOURS, S.; WEINTRAUB, A.; JOFRE, A.; GUNN, E.; HAIGHT R. G.; MARTELL, D.; MURRAY, A. T.; ROMERO, C. Operations research challenges in forestry: 33 open problems. **Annals of Operations Research**, v. 232, n. 1, p. 11-40, 2015.

RÖNNQVIST, M. **Optimization in forestry. Mathematical Programming**, Serie B 97, p. 267-284, 2003.

SALLUM JR., B. Governo Collor: o reformismo liberal e a nova orientação da política externa brasileira. **Revista Dados**, Rio de Janeiro. v. 54, n. 2, 2011, pg. 259 a 288.

SANCHES, N. S. **Colheita Florestal – História e os sistemas de colheita**. Disponível em <https://colheitademadeira.com.br/noticias/colheita_florestal__historia_e_os_sistemas_de_colheita/>. Acessado em: 08 de abril de 2019

SANT'ANNA, C. M.. Corte. In: MACHADO, C.C. (Ed.). **Colheita florestal**. 3. Ed. Viçosa, MG: UFV, 2014. p.74-105.

SANTANA, R. C.; FONTAN, I. C. I.; OLIVEIRA, S. L. Implantação, Manutenção e Produtividade dos Povoamentos. In: VALE, A. B.; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. P. (Editores). **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência**. Viçosa, SIF, 2014. 551p.

SCHETTINO S.; MINETTE, L. J.; SOUZA A. P. Correlação entre volumetria de florestas de eucalipto e produtividade e custos de máquinas de colheita de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.39, n.5, p.935-942, 2015.

SCHOLZ, J.; MEYER, A.; MARQUES, A. S.; PINHO, T. M.; CUNHA, J. B.; ORSHOVEN, J. V.; ROSSET, C.; KUNZI, J.; KAARLE, J. NUMMILA, K. Digital Technologies for forest supply chain optimization: Existing solutions and future trends. **Environmental Management**, v. 62, n. 6, p. 1108-1133, 2018.

SEIXAS, F.; CASTRO, G. P. Extração. In: MACHADO, C.C. **Colheita Florestal**. 3 ed. Viçosa, Ed. UFV, 2014. p. 106 – 161.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Parecer Único 183.530/2014**. Belo Horizonte: SEMAD, 2015, 45 p. Disponível em: <http://www.reunioes.semاد.mg.gov.br/down.asp?x_caminho=reunioes/sistema/arquivos/material/&x_nome=Item_9.1_-_CENIBRA.pdf>. Acesso em: 08 de abril de 2019.

SESSIONS, John; BOSTON, Kevin. Optimization of road spacing for log length shovel logging on gentle terrain. **International Journal of Forest Engineering**, v. 17, n. 1, p. 67-75, 2006.

SILVA, A. P.; SANTOS, J. C.; KONRAD, M. R. Teoria geral dos sistemas: diferencial organizacional que viabiliza o pleno entendimento da empresa. **Educação, Gestão e Sociedade**. Ano 6 numero 22, junho de 2016.

SHIMIZU, J. Y. **Pinus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 223p.

SOARES, N. S.; SILVA, M. L.; CORDEIRO, S. A. Produto interno bruto do setor florestal brasileiro, 1994 a 2008. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.4, p.725-732, 2014.

SOARES, N. S. **Potencial de implantação de um contrato futuro da madeira de reflorestamento**. 2006. 121f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. P.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. Viçosa: UFV. 2006. 276 p.

SODRÉ, E. Há 20 anos, o Brasil reabria os portos aos carros importados. Começava uma revolução. **O Globo**, 31 de março de 2010. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/economia/ha-20-anos-brasil-reabria-os-portos-aos-carros-importados-comecava-uma-revolucao-3031668>>. Acesso em: 20 de abril de 2019.

SOUSA, E. P.; SOARES, N. S.; SILVA, M. L.; VALVERDE, S. R. Desempenho do setor florestal para a economia brasileira: uma abordagem da matriz insumo-produto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.6, p.1129-1138, 2010

TRINDADE, A. D. Os irmãos Rebouças e as perspectivas da imigração espontânea no Paraná (1865 – 1875). **Anais...** IV Encontro Escravidão e Liberdade no Brasil Meridional, 2009. Disponível em: <<http://www.escravidaoeliberdade.com.br/site/images/Textos4/alexandrodantastrindade.pdf>>. Acesso em: 12 de abril de 2019.

VENTURIN, N.; CAMPINHOS JUNIOR, E.; MACEDO, R. L. G.; VENTURINI, R. P. Histórico. In: VALE, A. B.; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. P. (Editores). **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência**. Viçosa, SIF, 2014. 551p.

VIEIRA, G. C.; FREITAS, L. C.; CERQUEIRA, P. H. A.; SILVA, E. F.; BRITO, G. S.; SOUZA, A. M. Custos Operacionais e de Produção na Atividade mecanizada de Corte Florestal. **Nativa**, Sinop, v.4, n. 5, p. 342-346, 2016.

VOTORANTIM CELULOSE E PAPEL – VCP. **Sustainable growth with value creation and solid returns**. São Paulo: VCP, 2004. 28p.

ZATTI, C. **A história do Sul na linha do tempo**. Curitiba. IHGPR, 2017. 428p.